INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | LA VIDA INTERIOR DE LOS QUARKS | EVOLUCIÓN DE LOS PINGÜINOS | CULTIVO DE OJOS EN EL LABORATORIO | N.º 436 | ENERO 2013

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2013 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

ASTRONOMÍA
El refractor más grande del mundo

CAMBIO CLIMÁTICO
Factores que aceleran el calentamiento

PALEONTOLOGÍA
Evolución de los pingüinos

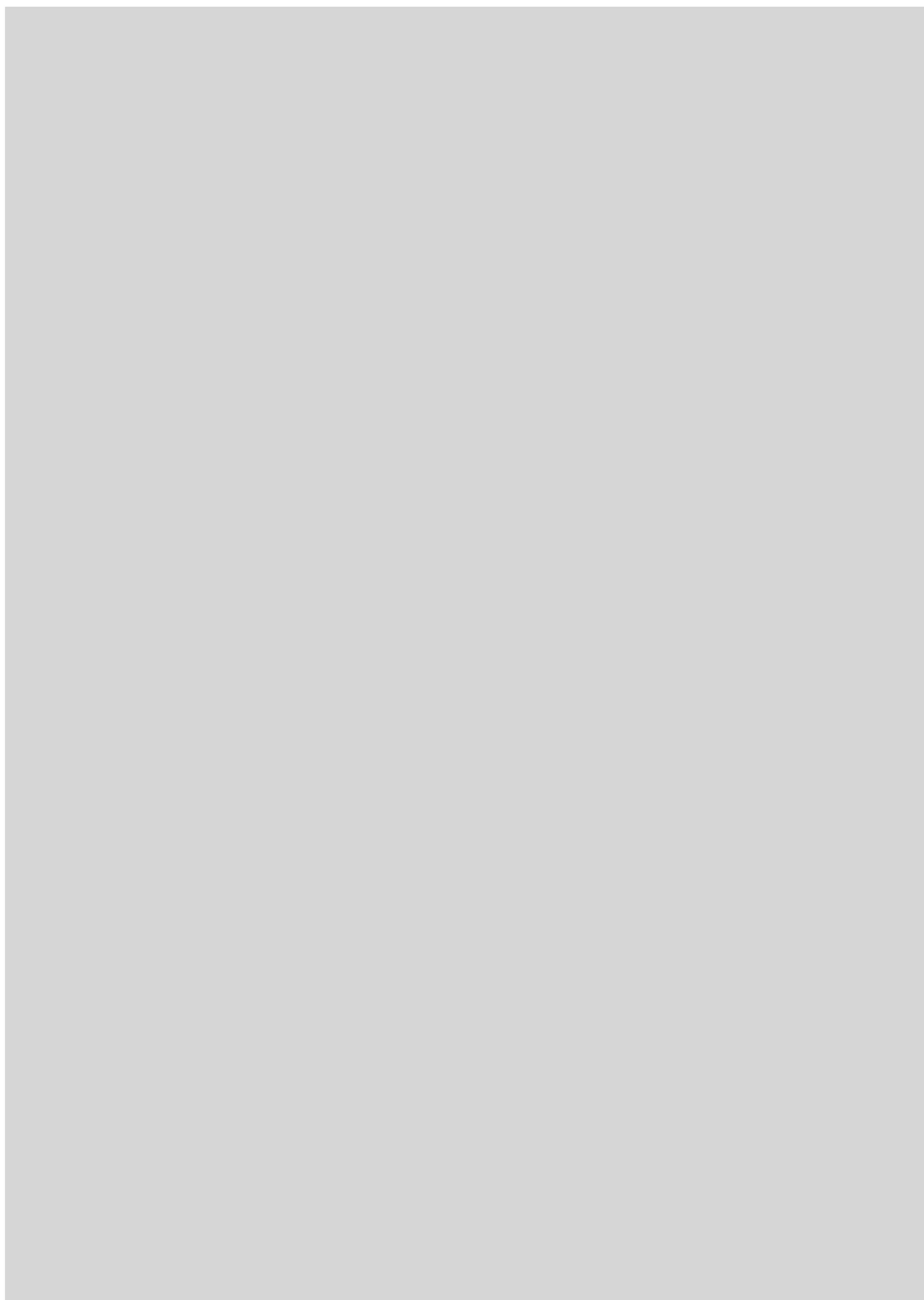
MEDICINA
Cultivo de ojos en el laboratorio

La vida interior de los quarks

¿Y si las partículas que creemos elementales poseyesen estructura interna?



6,50 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Enero 2013, Número 436

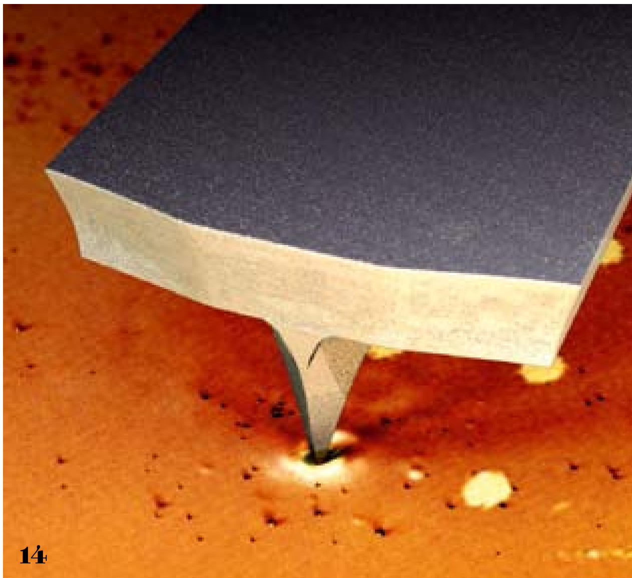


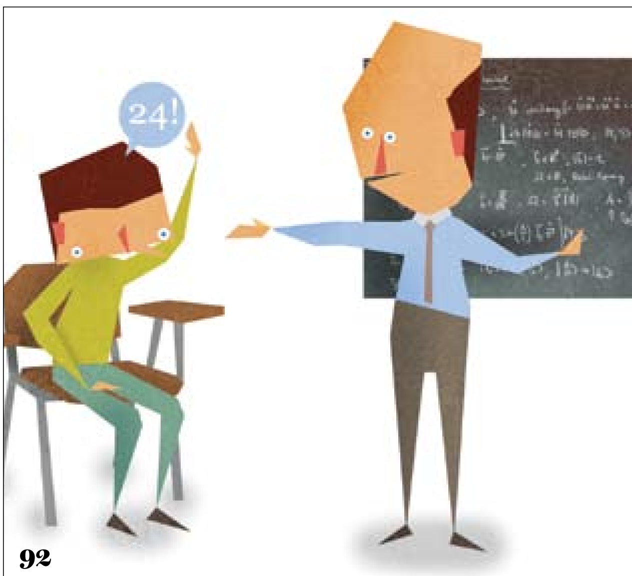
52

FRANS LANTING

ARTÍCULOS


5


14



92

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

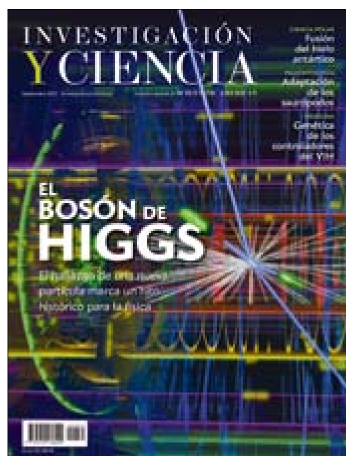
SECCIONES

EN PORTADA

Según el modelo estándar, los constituyentes últimos de la materia serían quarks y leptones: partículas puntuales carentes de subestructura. Sin embargo, algunas de sus propiedades parecen sugerir la existencia de preones, hipotéticos componentes aún más elementales. El LHC y otros experimentos podrían zanjar la cuestión en un futuro próximo. Fotografía de Craig Cutler.



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre 2012

MEZCLA DE FUSIONES

En «La fusión de la Antártida en directo» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2012], Douglas Fox sostiene que el hielo de ese continente está desapareciendo. Sin embargo, las gráficas del Centro Nacional de Datos sobre Hielo y Nieve de EE.UU. (NSIDC, nsidc.org/data/seaice_index/archives/index.html) revelan que la cantidad de hielo en la Antártida no disminuye, sino que aumenta.

Denny J.
McMinnville, Oregón

Responde Fox: *El artículo trata sobre el hielo de origen glaciar. Este se confunde a menudo con el hielo marino, pero la distinción entre uno y otro reviste una importancia clave. El hielo marino (cuya evolución es la que figura en la página web del NSIDC) conforma una delgada lámina de entre pocos decímetros y dos metros y medio de espesor, creada por la congelación de la superficie del mar durante el invierno. El hielo glaciar se origina en tierra, a partir de la nieve acumulada y compactada durante miles de años. En ciertos lugares de la Antártida, los glaciares se deslizan hacia la costa y penetran en el océano. Esas extensiones flotantes de hielo glaciar reciben el nombre de plataformas de hielo y suelen alcanzar espesores de entre 150 y 500 metros, muy superiores al del hielo marino.*

Al contrario de lo que ocurre con el hielo marino, el cual ha venido mostrando durante los últimos años un ligerísimo incremento, las plataformas de hielo de la península Antártica septentrional se encuentran en claro retroceso. En los últimos 30 años se han derrumbado cuatro plataformas en la costa oriental de la península y otras dos lo han hecho en el lado oeste. También se ha observado un retroceso en las plataformas de hielo de la costa del mar de Amundsen, en la Antártida occidental.

Si bien el hielo marino no desempeña un papel relevante en el aumento del nivel del mar, las plataformas de hielo ejercen una función clave, pues contienen el avance de los glaciares que se deslizan hacia el océano. Cuando una plataforma de hielo desaparece, los glaciares avanzan hacia el mar a una velocidad entre dos y nueve veces mayor. La inmersión de ese hielo en el océano sí contribuye al incremento del nivel del mar. Un gran número de técnicas aéreas y vía satélite, entre las que se incluyen mediciones gravimétricas y de altimetría láser, han confirmado que las capas de hielo de la Antártida están perdiendo entre 100.000 y 150.000 millones de toneladas al año.

¿QUÉ ES LA ENERGÍA?

En el artículo «Una ventana al primer instante del universo» [por Daniel G. Figueroa y Juan García-Bellido; Investigación y Ciencia, diciembre de 2012], los autores hablan del concepto de «energía» (y su conversión en materia instantes después de la gran explosión). Para mí, este concepto representa un verdadero misterio. Más allá de la famosa ecuación de Einstein, según la cual la energía es igual a la masa multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado, la energía en sí, ¿qué es? ¿Podrían los autores del artículo explicarlo?

Victor Manuel Alarcón Viudes

Responden los autores: *La energía es un concepto físico fundamental que mide la capacidad de cambio de un sistema. Aunque se presenta en formas diversas, estas pueden englobarse en dos tipos básicos: energía cinética y energía potencial. La primera se relaciona con el movimiento; la segunda, con la intensidad de las interacciones (gravitatoria, electromagnética, etcétera).*

La energía total de un sistema físico aislado siempre se conserva; es decir, ni se crea ni se destruye. Sin embargo, la energía cinética puede transformarse en energía potencial, y viceversa, pues lo único que ha de conservarse es la suma de ambas. Un ejemplo clásico de la transformación de energía potencial (gravitatoria) en cinética tiene lugar cuando dejamos caer un objeto al suelo. Cuando este se encuentra en el lugar desde el que se precipita, a determinada altura, posee cierta energía potencial debido a su interacción gravitatoria con la Tierra. A medida que cae, dicha energía potencial se transforma paulatinamente en energía cinética. Ello se refleja en un aumento de la velocidad, tanto mayor es la altura desde la que cae.

En el caso del universo primitivo, la energía potencial del campo del inflatón provocó la rápida expansión del universo que caracteriza a la inflación cósmica. Cuando esta terminó, esa energía potencial se convirtió en radiación y materia, un proceso conocido como recalentamiento del universo. De hecho, las partículas que componían esa radiación y materia poseían una energía cinética enorme. La ecuación de Einstein a la que alude el lector, $E = mc^2$, nos indica cuánta energía hace falta para crear una partícula de cierta masa. En el contexto del recalentamiento, la energía potencial del inflatón se invirtió, por un lado, en crear partículas dotadas de masa y, por otro, en conferir energía cinética a dichas partículas. Ese proceso constituye la verdadera gran explosión de la teoría.



Diciembre 2012

PSICOLOGÍA

De los perros que persiguen su propio rabo

Los pastores alemanes que persiguen de forma interminable su propia cola y los bull terriers que cazan moscas invisibles resultan entrañables para algunos propietarios de animales domésticos. Pero unos investigadores sostienen que estos comportamientos espontáneos de los perros podrían ser manifestaciones de un trastorno obsesivo-compulsivo (TOC) y quizás arrojen luz sobre esta dolencia en los humanos.

«Algunas de estas compulsiones son más comunes en ciertas razas, lo que da a entender que existe un factor genético», afirma Hannes Lohi, profesor de genómica canina de la Universidad de Helsinki y uno de los autores de un estudio sobre las compulsiones caninas publicado en julio de 2012 en *PLoS ONE*. Para saber más del trastorno, Lohi y sus colaboradores repartieron un detallado cuestionario entre 368 propietarios de perros en Finlandia. Ciento cincuenta de los perros no mostraban signos de compulsión; servían de control. También tomaron muestras de sangre a 181 de los participantes caninos, que pertenecían a cuatro razas: bull terrier, bull terrier enano, bull terrier de Staffordshire y pastor alemán.

Sostienen que varias características del trastorno compulsivo canino son similares a las del TOC humano. Al igual que las personas, los perros con trastornos compulsivos solían empezar a mostrar comportamientos repetitivos antes de llegar a la madurez sexual. Algunos sufrían solo unos pocos episodios en toda su vida, mientras que otros repetían el comportamiento a lo largo del día durante períodos extensos. A menudo, los miembros de una misma camada mostraban en su conducta la misma disposición. «Podría haber elementos biológicos comunes tras el desarrollo de la enfermedad», afirma Lohi.

No todo el mundo está de acuerdo. Perminder Sachdev, director del Instituto de Neuropsiquiatría del Hospital Príncipe de Gales de Randwick, Australia, señala que los humanos, a diferencia de los animales, normalmente reconocen estos comportamientos angustiosos e intentan controlarlos. Perseguir la propia cola, argumenta, es más parecido al comportamiento estereotipado y repetitivo que se da a menudo en personas con autismo. «Creo que cuesta defender que un perro que persigue su propio rabo es un modelo genuino de TOC», afirma Sachdev. Lohi, sin embargo, tiene planeado profundizar más en las conexiones entre hombres y perros en futuros estudios.

—*Rachel Nuwer*



¿QUÉ ES ESTO?



El hielo desaparece: Está retrocediendo el hielo en el mundo. Este verano, el 97 por ciento del manto de hielo superficial de Groenlandia se ha derretido y la parte del océano Ártico cubierta por el hielo fue la menor de que haya constancia en los registros. El glaciar Fedchenko, de la cordillera del Pamir, en Asia Central, ha perdido 1400 metros de longitud en los últimos 80 años. Puede, sin embargo, que la pérdida de nieve y hielo (*azul en esta imagen en color artificial*) de este glaciar vaya más despacio en adelante. Según se publicó en septiembre de 2012 en *Nature Climate Change*, las precipitaciones han aumentado en la zona, lo que podría contribuir a que grandes glaciares como este subsistan un poco más.

—*Ann Chin*

CORTESÍA DE JESSE ALLEN Y ROBERT SIMMON, OBSERVATORIO DE LA TIERRA, NASA (*glaciar*); THOMAS FUCHS (*ilustración*)

ESPACIO

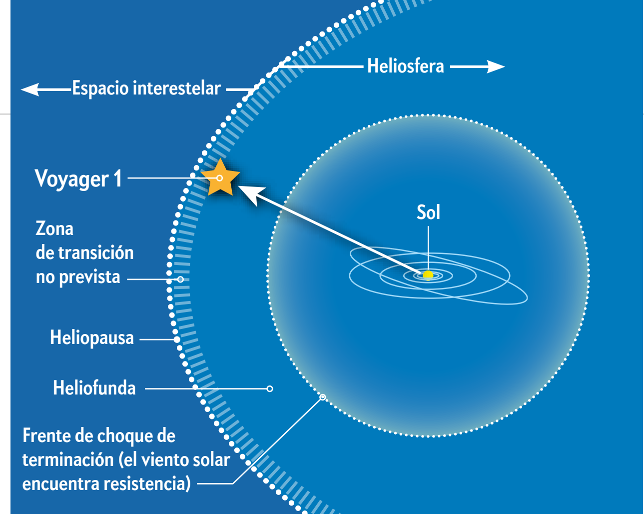
La última frontera

El viaje hasta el exterior del sistema solar de la sonda espacial Voyager 1 de la NASA ha sido largo y extraño, y quizá tarde todavía un poco más en llegar hasta allí.

La sonda Voyager 1, lanzada hace 35 años, se ha aventurado más lejos de la Tierra que ningún otro vehículo espacial. Se encuentra actualmente a 18.200 millones de kilómetros del Sol, más del triple de la distancia media de Plutón. Está cerca de conseguir un logro asombroso: escapar de la jurisdicción del Sol e internarse en el espacio interestelar. Un nuevo estudio, sin embargo, sugiere que la sonda está más lejos de lo que se suponía de dar ese paso sin precedentes.

Hace casi ocho años, la sonda se introdujo en la heliofunda, donde el viento solar (el plasma procedente del Sol) es frenado por el empuje en sentido contrario del plasma interestelar. En 2010, la velocidad del viento solar en la dirección de avance de la Voyager 1 se quedó inesperadamente en cero. Se esperaba que la sonda se encontrara, al acercarse a la heliopausa (la frontera entre la heliofunda y el espacio interestelar), con que los flujos del plasma interestelar desviaban lateralmente el plasma solar.

En el número del 6 de septiembre de *Nature*, sin embargo, Robert B. Decker, del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, y sus colaboradores informaban de que no se estaba produciendo ninguna desviación. El nuevo estudio plantea dos posibilidades: o la Voyager 1 aún no se ha acercado a la heliopausa o el plasma se mueve allí de maneras inesperadas.



El espacio lejano: la sonda Voyager 1 podría estar acercándose a la heliopausa.

Según una estimación anterior, la heliopausa podría encontrarse justo un poco más allá de donde está ahora el emisario más viajado de la humanidad o hasta siete años de viaje más lejos. Los nuevos datos parecen apuntar a la segunda posibilidad. Decker, sin embargo, dispone de datos más recientes que complican las predicciones. En los últimos meses la Voyager 1 ha detectado una mezcla de partículas locales e interestelares que podrían indicar la llegada de la sonda a otra frontera, o a una nueva zona del espacio, que no estaba prevista.

—John Matson

BIOLOGÍA

El sabor de la mostaza y los insectos

Cuando pedimos el tarro de la mostaza no se nos pasa por la cabeza que la especia pueda ser un sistema de defensa de la naturaleza. Una investigación reciente, sin embargo, ha encontrado que los compuestos que provocan el sabor picante de la mostaza les sirven a las plantas para repeler los insectos.

Un grupo de investigadores de la Universidad Duke, del Instituto Max Planck de Ecología Química, en Jena, y de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign estudió la especie *Boechera stricta* de la planta de la mostaza. Observaron dos poblaciones de *B. stricta* en las Montañas Rocosas, una en Montana y otra en Colorado. El sabor de las dos era picante, pero un poco diferente; parecía indicar la presencia de compuestos distintos en cada región. El equipo describió con detalle sus resultados en el número del 31 de agosto de 2012 en la revista *Science*.



En primer lugar, analizaron en el laboratorio especímenes de las poblaciones de Colorado y Montana. El análisis molecular detectó tres genes, denominados familia *BCMA*, que codifican una enzima que inicia la producción de los compuestos que proporcionan a cada variedad de mostaza su sabor distintivo. Dependiendo de qué genes *BCMA* se hallen presentes, la enzima resultante producirá el sabor característico de una planta de Montana o de una de Colorado.

Después, Thomas Mitchell-Olds, de la Universidad Duke, y sus colaboradores plantaron miles de plantas de mostaza de Colorado y de Montana, juntas, en campos de ambos estados. Encontraron que los insectos de Montana se mantenían alejados de las plantas de Montana pero devoraban la variedad de Colorado. Su aversión sugiere que la especia de la mostaza de Montana tiene una formulación específica para repeler los insectos locales. Por lo tanto, es posible que, hace muchas generaciones, una mutación de los genes *BCMA* crease una familia de plantas cuya especia, la actual de Montana, repelía con tanto éxito los insectos que se hizo común en la población.

En la plantación de Colorado las cosas resultaron ser un poco diferentes. Los insectos tenían allí un paladar menos exigente: devoraron la mostaza local y la foránea con un deleite similar. Tienen que continuar las investigaciones para desentrañar el porqué de esta diferencia, pero podría deberse a que el entorno de Colorado es más competitivo y los ávidos insectos tienen que soportar el malestar causado por la especia si no quieren perecer de inanición.

Un tercer dato experimental añade un matiz a la variación de los genes *BCMA* en la mostaza. Los investigadores modificaron genéticamente *Arabidopsis*, una especie estrechamente emparentada con *B. stricta*, para que expresase los genes *BCMA* y produjese, bien la variedad de especia de Colorado, bien la de Montana. Cuando los investigadores expusieron a los insectos sus plantas de penetrante sabor de la especie *Arabidopsis*, descubrieron que la variación en los genes *BCMA* podía tener sus pros y sus contras. Aunque los compuestos químicos de la especia repelen ciertos insectos y patógenos, aumentan su vulnerabilidad ante otros. Los investigadores esperan entender mejor con un nuevo experimento cómo afectó el compromiso entre lo uno y lo otro a la evolución regional del sabor de *B. stricta*.

—Daisy Yuhas

JEN CHRISTIANSEN (*ilustración*); CORBIS (*mostaza*)



TECNOLOGÍA

Cucarachas al rescate

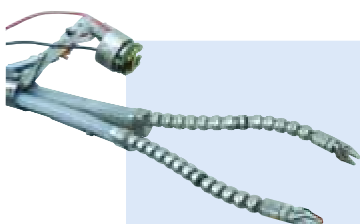
Las cucarachas provocan de ordinario sentimientos de repugnancia, no de alivio. Pero si alguien estuviera atrapado en un edificio derrumbado y los equipos de rescate enviasen una para encontrarlo, quizá la reacción sería otra.

Un grupo de investigadores ha aprovechado la asombrosa capacidad de supervivencia de las cucarachas de una forma que podría ayudar a los seres humanos que sufren los efectos de un desastre. Para dirigir los movimientos de estos insectos se les envían impulsos inalámbricos a las antenas. Puesto que las usan como sensores táctiles, su estimulación los lleva a sentir que hay un objeto que deben evitar y a moverse en dirección opuesta.

«Lo que hacemos es parecido a montar a caballo», afirma Alper Bozkurt, del departamento de ingeniería eléctrica e informática de la Universidad estatal de Carolina del Norte. Bozkurt y el doctorando Tahmid Latif presentaron su investigación el pasado mes de agosto en la 34.ª Conferencia Internacional de la Sociedad de Ingeniería para la Medicina y Biología del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

El equipo colocó dispositivos eléctricos a modo de mochilas en cucarachas gigantes de Madagascar. Cada mochila incluía un circuito impreso con un microcontrolador, un receptor de señales inalámbricas y una batería de ion de litio en polímero. Pequeños electrodos de acero inoxidable conectaban las placas a las antenas de las cucarachas. A los receptores de las mochilas se enviaban inalámbricamente impulsos eléctricos que estimulaban la antena derecha o la izquierda. En el futuro, estos insectos podrían llevar una cámara diminuta con la que los equipos de rescate buscarían supervivientes. Bozkurt y Latif ven en sus cucarachas una alternativa a los robots miniaturizados, que son muy difíciles de diseñar.

—Larry Greenemeier



CIRUGÍA

Cirujanos robóticos

Se dirá que la cirugía laparoscópica moderna es mínimamente invasiva, pero sigue requiriendo múltiples incisiones. Para conseguir que las laparoscopias sean aún menos invasivas, un grupo de científicos y cirujanos de la Universidad de Columbia y de la Universidad Vanderbilt han construido un robot que se introduce en el cuerpo a través de una única incisión de 15 milímetros o de una abertura natural, la boca por ejemplo. Una vez dentro del cuerpo, el robot, que aún no se ha ensayado en humanos, se despliega como una nave espacial de la NASA, comunica su posición por medio de un cable conectado a un ordenador externo y obedece las instrucciones de avanzar, detenerse, aplicar puntos de sutura o realizar otras acciones. Incluye una cámara que sigue los movimientos de los instrumentos quirúrgicos de modo que se pueda verlos en un terminal de ordenador. Los diseñadores afirman que podría llevar a cabo apendicectomías, histerectomías, algunos tipos de cirugía del riñón y posiblemente cirugía del oído y de la garganta.

Ahora se debe de estar empezando a probar la Plataforma Robótica Efectora Insertable (IREP, por sus siglas en inglés) con animales; el dispositivo podría estar disponible en cinco años. Hasta ahora, ningún estudio ha proporcionado pruebas concluyentes de que la cirugía robótica sea preferible a las técnicas laparoscópicas tradicionales, pero los creadores de IREP dicen que es más ligera y más barata que el principal sistema quirúrgico actual, denominado Da Vinci. «Ciertamente, la idea encierra un potencial», afirma William Lowrance, experto en cirugía robótica de la Universidad de Utah, y añade que quizá resultaría más diestra y precisa que las herramientas laparoscópicas tradicionales.

—Lina Zeldovich

THOMAS FUCHS (*ilustración*); CORTESÍA DE DENNIS FOWLER Y NABIL SIMAAN, UNIVERSIDAD COLUMBIA (*robot*); PARQUE DE LAS CIENCIAS (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

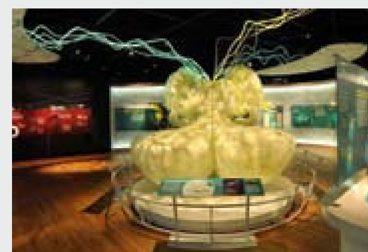
9 de enero
Mitos y realidades de la energía: Incorporando a la ciencia en el debate sobre política energética
Vaclav Smil, Universidad de Manitoba (Canadá)
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

23 de enero
El genoma humano. Del pasado al futuro.
Roderic Guigó
Centro de Regulación Genómica
Barcelona
www.crg.eu

EXPOSICIONES

El bosque quemado
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

Cerebro. Viaje al interior
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com



Exposición itinerante
El instrumento científico más grande jamás construido: Una exposición del CERN
Varias ciudades
(enero 2013: Sevilla y Oviedo)
www.i-cpan.es/expocern

OTROS

16 y 17 de enero - Debate
Prematuros extremos. Mejora de los cuidados perinatales
Cosmocaixa
Barcelona
www.bdebate.org

Del 10 de enero al 21 de marzo - Curso
Los avances de la química y su impacto en la sociedad (3ª edición)
Sala de prensa del CSIC
Madrid
www.losavancesdelaquimica.com

COSMOLOGÍA

La galaxia espiral más antigua


Recreación artística de la galaxia BX 442.

El universo primitivo era un lugar convulso y desordenado. Las galaxias chocaban entre sí mucho más a menudo que en la actualidad y en su interior las estrellas se arracimaban en grupos caóticos e irregulares. Unas condiciones muy poco propicias para que surgiesen galaxias espirales, ordenadas y delicadas como la Vía Láctea o Andrómeda.

Con todo, hace unos meses un grupo de astrónomos halló una pequeña joya en medio de aquel caos primordial. A partir de un sondeo de cientos de galaxias que existieron pocos miles de millones de años después de la gran explosión, los investigadores descubrieron una de brazos espirales muy bien delineados. Los resultados, que fueron publicados en el número del 16 de julio de la revista *Nature*, podrían ayudar a explicar por qué las galaxias espirales eran tan poco frecuentes en esa época.

El nuevo objeto, bautizado como BX 442, fue identificado entre las imágenes del telescopio espacial Hubble como una espiral que habría existido unos 3000 millones de años después de la gran explosión. Parece corresponder a cierta variedad de galaxias denominadas *de gran diseño*, aquellas en las que unos brazos espirales muy marcados conforman un disco igualmente bien definido.

Aunque las galaxias espirales pueblan hoy el cielo, a medida que los astrónomos observan objetos cada vez más lejanos (y, por tanto, más y más antiguos), las estructuras con geometría espiral tienden a desaparecer. En su lugar pululan galaxias irregulares e informes; el equivalente cósmico de una fase adolescente. Sin embargo, BX 442 adquirió de algún modo una estructura espiral muy regular, quizá como consecuencia de un encuentro previo con una galaxia menor. «Hasta donde podemos ver, [BX 442] parece poseer una pequeña galaxia compañera a un lado», explica David Law, astrofísico de la Universidad de Toronto y autor principal del estudio. Si la diminuta vecina hubiese sido la desencadenante, los brazos espirales probablemente desaparezcan en unos cien millones de años, vaticina Law. La naturaleza transitoria de una estructura espiral en aquella época podría explicar el carácter excepcional de las galaxias espirales.

Existen sin embargo otras posibilidades. La galaxia BX 442 podría haber generado su propia estructura espiral sin necesidad de un empujón de su compañera. Las grandes agrupaciones de gas y estrellas en el seno de una galaxia pueden provocar que esta desarrolle una geometría espiral; y, de hecho, BX 442 parece contener al menos una de esas agrupaciones en uno de los brazos.

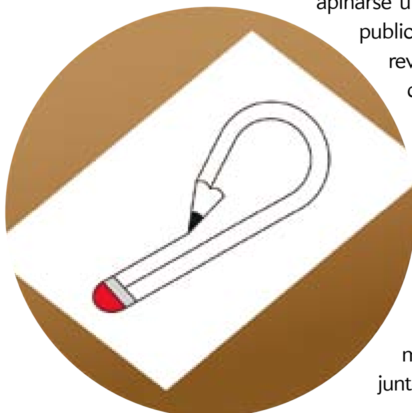
Tal vez exista una gran variedad de procesos por medio de los cuales una galaxia puede acabar adquiriendo una geometría espiral. Una vez que los observatorios de nueva generación, como el Telescopio Espacial James Webb, de la NASA, se hallen en funcionamiento, debería ser posible estudiar un gran número de ejemplos a lo largo de las distintas edades cósmicas.

—John Matson

MATERIALES

Nanopartículas que se autoensamblan

Como si de los miembros de una torre humana se tratase, ciertas partículas nanoscópicas podrían adquirir la facultad de organizarse de manera espontánea en estructuras intrincadas de mayor tamaño. En una investigación reciente, un grupo de expertos de la Universidad de Michigan ha hallado que la geometría de un objeto afecta en gran medida a la manera en que tiende a aglomerarse con sus vecinos. En consecuencia, el diseño de nanopartículas con la forma adecuada permitiría que estas engendrasen estructuras predecibles sin más que forzarlas a apiñarse unas con otras. El estudio, que apareció publicado en el número del 27 de julio de la revista *Science*, podría resultar clave en el diseño de nuevos materiales.



Los investigadores realizaron varias simulaciones informáticas para estudiar la manera en que 145 tipos de partículas con formas poliédricas idealizadas tenderían a amontonarse. En la mayoría de los casos, los poliedros se organizaron solos para formar retículos cristalinos o estructuras similares a un cristal. En un trabajo previo junto con otros colaboradores, Sharon Glotzer, coautora del estudio, ya había hallado que ciertas geometrías exhibían una tendencia natural a apiñarse de manera ordenada. Sin embargo, las nuevas simulaciones han demostrado que dicho comportamiento se corresponde más bien con la regla que con una excepción.

En algunos casos, de hecho, el ensamblaje de las partículas procedió con una coordinación asombrosa. Una estructura piramidal de base cuadrada se ordenó primero en «supercubos» compuestos por seis pirámides cada uno para formar luego un retículo cúbico de mayor tamaño. Además, los investigadores hallaron que el comportamiento colectivo de cada tipo de partícula estaba lejos de resultar aleatorio: en el 94 por ciento de los casos, bastaban dos números (el cociente isoperimétrico, que codifica información sobre la geometría de la partícula, y el número de coordinación, que determina de cuántas vecinas se rodeará cada una) para predecir la estructura cristalina final.

El vínculo entre la geometría de una partícula y la forma en que tiende a autoorganizarse podría aprovecharse para diseñar nanopartículas con un comportamiento colectivo determinado. «En cierto modo, se trata del santo grial de la investigación sobre materiales: sin más que echar un vistazo al aspecto de los bloques constituyentes, predecir todas las estructuras cristalinas estables a las que puede dar lugar», explica Glotzer. «Este estudio supone un primer paso en esa dirección», concluye.

—John Matson

CORTESÍA DE JOE BERGERON, INSTITUTO DUNLAP DE ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA (*galaxia BX 442*); THOMAS FUCHS (*ilustración*)

CONSERVACIÓN

La totoaba, un pez enigmático del golfo de California

La escasez de datos científicos acerca de la biología de la especie impide plantear estrategias fundadas para su conservación

La totoaba (*Totoaba macdonaldi* Gilbert, 1890) es una especie emblemática de la familia Sciaenidae y del orden Perciforme que constituyó la primera y más importante pesquería en el golfo de California a inicios del siglo pasado. La historia de esa pesquería registró todas las fases por las que atraviesa un recurso renovable explotado. Las capturas aumentaron hasta un máximo histórico de 2261 toneladas en 1942 y disminuyeron hasta un mínimo de 59 toneladas en 1975.

Las causas de ese declive constituyen todavía un tema de debate, aunque tres son las mencionadas con mayor frecuencia: la captura accidental o incidental por barcos camaroneros, la sobrepesca de la población reproductora y la alteración de las áreas de crecimiento y reproducción provocada por el control del flujo del río Colorado al golfo de California.

En 1975, el Gobierno de México declaró una veda permanente como una medida administrativa para evitar el colapso de la pesquería. Finalmente, en 1976, la totoaba se incluyó en el apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestre (CITES). Más tarde se catalogó con diferentes niveles de amenaza en otros instrumentos de conservación, como la Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza en 2000, que la clasificó como en peligro crítico, y la NOM059 de México en 2001, que la catalogó como en peligro de extinción. La totoaba fue la primera especie de pez marino considerada en peligro de extinción.

En la actualidad, el pez vive en el golfo de California y sus zonas de desove y de crianza se hallan en un área natural protegida (declarada en 1993 Reserva de la Biosfera Alto Golfo y Delta del Río Colorado), donde recibe protección junto a la vaquita marina, (*Phocoena sinus*) un mamífero marino, también en peligro de extinción.

Información insuficiente

Los datos disponibles para la toma de decisiones de conservación se obtuvieron cuando la pesquería se hallaba en funcionamiento. En tiempo reciente, los pescadores de pesca deportiva de la región han reclamado que la especie ya se ha recuperado. Como consecuencia de esa apreciación, varios sectores públicos y privados, así como expertos en la especie, han llevado a cabo reuniones para determinar el estado de salud de la totoaba. La dirección de Vida Silvestre de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México ha llegado a la conclusión de que existe escasa información científica que permita plantear alguna estrategia de manejo diferente a la ya establecida por la declaratoria de protección de la especie.

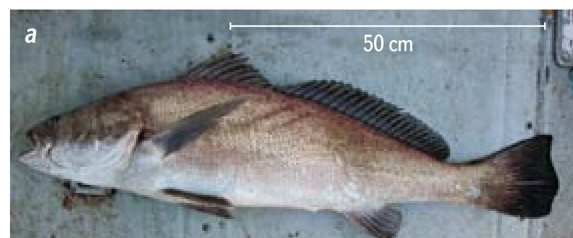
En concreto, se desconocen el volumen y la calidad de los datos generados acerca de las poblaciones naturales durante el período de la protección legal, así como numerosos detalles relativos a los esfuerzos de conservación realizados. Ni tampoco se sabe si, durante el colapso de la pesquería, la especie sufrió un cuello de botella que comprometiera el potencial adaptativo.

En cuanto a la conservación, en 1995 se inició un programa que continúa hasta la actualidad para la recuperación de la totoaba. Se basa en el empleo de técnicas de reproducción asistida a través de la recolección de adultos reproductores y la liberación de crías después de haber controlado parte del ciclo biológico en cautiverio. Gracias a estas iniciativas, se cuenta ahora con una base biotecnológica para el cultivo de la especie.

Sin embargo, han surgido nuevas preguntas: ¿tienen las crías liberadas la capacidad de adaptarse al medio y contribuir a la recuperación de la especie, o solo constituyen una fuente de alimento para los peces piscívoros del Alto Golfo? ¿Son adecuados el número y la procedencia de los reproductores para el sitio donde se realiza la repoblación? ¿Qué impacto ejerce la liberación de crías obtenidas con un número reducido de reproductores sobre la diversidad genética de las poblaciones naturales?

Lamentablemente, es notoria la falta de investigaciones sobre la biología de la especie en su ambiente natural, por lo que los intentos de repoblamiento propuestos por la acuicultura podrían representar una amenaza, en lugar de cumplir con los fines deseados. Hay que reconocer, por tanto, que, debido a la falta de evaluaciones genéticas de las poblaciones naturales y de aquellas en cautiverio, no es posible determinar el éxito de la reproducción asistida.

Nuestro grupo de trabajo ha estado trabajando desde 2010 en un estudio in-





***Totoaba macdonaldi*. Ejemplar juvenil (*a*) y ejemplar adulto (*b*).**

F.J. GARCÍA DE LEÓN

tegral para determinar el estado de salud de la totoaba y revisar su estado de conservación en el golfo de California.

Los estudios genéticos

¿Cómo puede la información genética auxiliar en los esfuerzos para la conservación de la totoaba? Mediante la inspección de la diversidad genética de la especie pueden acotarse diversos aspectos biológicos evolutivos. Por ejemplo, puede estimarse el tamaño efectivo de la población (el número mínimo de reproductores que dejan descendencia de una generación a otra), lo que permitirá verificar si el colapso pesquero erosionó la diversidad genética y, por consiguiente, el potencial adaptativo de la especie.

Además, el estudio del ADN aportará herramientas moleculares para la práctica forense animal (disciplina que ayuda a resolver casos de tráfico ilegal de fauna) con el objeto de identificar la especie en caso de pesca furtiva, un aspecto necesario dado el auge de la pesca deportiva local. Otras preguntas cruciales deben responderse para guiar las políticas del manejo y conservación. Por un lado, cabe determinar si la totoaba conforma una única población panmítica (genéticamente homogénea) en el golfo de California. Por otro, comprobar mediante marcadores del ADN mitocondrial y microsatélites del ADN nuclear si la totoaba presenta una conducta de filopatría, o fidelidad a regresar a una o a varias zonas de reproducción.

Los estudios genéticos hasta ahora realizados por nuestro grupo apoyan la hipótesis de que la drástica caída en la abundancia de esta especie, causada por su extensa explotación en el último cuarto del siglo pasado, no erosionó la diversidad genética. Sin embargo, para fines de conservación y manejo, aún es necesario seguir realizando estudios genéticos espaciotemporales, así como evaluar genéticamente los reproductores que se están usando en la repoblación de la especie. Con esta información de base se podrá diseñar una estrategia de manejo sostenible para responder a dos necesidades que pudieran hallarse contrapuestas: por un lado, la demanda de los pescadores deportivos de la región y, por otro, evitar la extinción de la especie.

Cabe destacar un último aspecto. Resulta fundamental para México, un país con una enorme diversidad biológica, cada vez más amenazada por las actividades humanas, fortalecer grupos de investigación que desarrollen una metodología específica para evaluar los riesgos de extinción de especies y proponer medidas de protección, recuperación y utilización sostenible.

—Francisco Javier García de León
Laboratorio de genética para la conservación
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
La Paz, Baja California Sur, México
Fundación CEQUA, Punta Arenas, Chile

MATERIALES

Cómo se fracturan los materiales

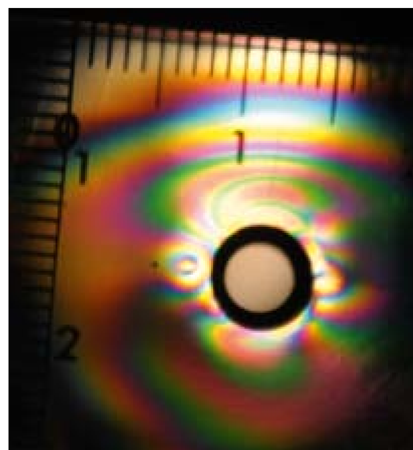
Un nuevo modelo tridimensional permite describir y predecir la rotura de rocas, cerámicas, polímeros, vidrios y metales

La fractura constituye una de las transformaciones más fundamentales a las que puede someterse un sólido. Desde hace siglos, los humanos hemos aprendido a dominarla para satisfacer nuestras necesidades. Las sociedades de la Edad de Piedra utilizaban, a modo de herramientas o armas, lascas de sílex o cuarzo retocadas. El dominio de la fractura en el proceso de elaboración de estos útiles resultó de vital importancia para la supervivencia de nuestros antepasados. Comprender la fractura también ha sido necesario en otros ámbitos, como la escultura o la minería, en los que se requiere la manipulación de materiales sólidos. Asímismo, sin un control exquisito de la rotura de los materiales de construcción, no existirían las pirámides de Egipto, los edificios del período clásico o las prodigiosas catedrales góticas.

Primeros hallazgos

Durante la Antigüedad se tenía un conocimiento de la fractura profundo, pero a la vez muy empírico y artesanal. Con la llegada de la revolución científica del siglo XVII se comenzó a estudiar este fenómeno de una manera más sistemática y cuantitativa. Galileo Galilei observó que, para un mismo material, el peligro de rotura dependía, entre otros factores, del tamaño del objeto.

Los primeros trabajos que ahondaron en la comprensión de la fractura aparecieron tras finalizar la Primera Guerra Mundial. El ingeniero inglés Alan Arnold Griffith desarrolló una teoría que conciliaba aparentes contradicciones a las que no se había podido dar explicación hasta la fecha. Aclaraba, entre otras cuestiones, por qué la tensión necesaria para romper materiales como el vidrio era mucho menor que la requerida para deshacer sus enlaces químicos, o por qué la fuerza que debía aplicarse para romper las fibras de vidrio crecía cuando su grosor disminuía. Ambos fenómenos guardan relación con el hecho de que la fractura de un objeto depende, como indicó Galileo, de su tamaño y forma. Estos conceptos se aplican diariamente en los dispositivos abrefácil,



Durante el proceso de fabricación de un objeto se establecen ya algunos de los parámetros que determinarán su rotura. Esta fotografía muestra la distribución de tensiones en torno al agujero de una regla que marcará su futura rotura. Comprender la evolución de las fracturas nos permite construir objetos más resistentes o más frágiles en función de las necesidades.

ANTONIO J. PONS

en el taladrado de los rollos de papel higiénico o en el dibujo de las tabletas de chocolate, diseños que nos permiten romper dichos objetos de una manera controlada y sin la necesidad de ejercer grandes tensiones.

Modelos teóricos alternativos

A pesar de los grandes avances realizados tras los desarrollos de Griffith, todavía nos hallamos lejos de comprender con profundidad el fenómeno de la fractura, ya que su estudio teórico entraña una complejidad notable. Son tan grandes los obstáculos, que conocemos mejor la trayectoria de un cohete espacial en su viaje a la Luna o Marte que la de una fisura que avanza a través de un vidrio o plástico. Existe una gran diversidad de materiales con comportamientos diferentes y también numerosas configuraciones de esfuerzos a los que puede someterse un sólido, que, a su vez, dan lugar a fenomenologías muy variadas.

La fractura es, además, un proceso dinámico no lineal que opera en diferentes escalas espaciotemporales. Ello dificulta incluso el simple planteamiento de las ecuaciones matemáticas que rigen toda su dinámica. Tradicionalmente, este problema se ha resuelto restringiendo la escala espacial a la que se quería describir el fenómeno. Se ha planteado, pues, una descripción microscópica del comportamiento de los enlaces entre átomos o moléculas que intervienen durante el proceso de fractura [*véase* «Por qué se rompen los objetos», por Mark E. Eberhart; Investigación y Ciencia, diciembre de 1999]. Para la descripción a escala macroscópica, en cambio, han bastado las ecuaciones de la elasticidad clásica. La dificultad reside, pues, en plantear un modelo teórico en el que la fenomenología microscópica y la macroscópica se den la mano.

Pero no acaban ahí las dificultades. La fractura constituye un ejemplo típico de problema de frontera libre. Solemos hallar este tipo de problemas cuando queremos describir una superficie que separa dos regiones del espacio y que evoluciona a lo largo del tiempo. Un ejemplo clásico corresponde a la solidificación de un líquido. En la superficie que separa la fase líquida y la fase sólida se establece la condición que permite conectar la dinámica del sólido y la del líquido. La posición de esta superficie se convierte, pues, en un ingrediente imprescindible para plantear el problema y, a su vez, constituye la solución del mismo. En el caso que nos ocupa, la posición del frente de factura determina la distribución de tensiones que se establecen en el interior del sólido y, estas, a su vez, condicionan la posterior evolución del frente de fractura. Este tipo de problemas entraña una gran complejidad matemática. Su resolución ha llevado a numerosos investigadores a abordarlo desde diferentes perspectivas.

Fractura en modo mixto

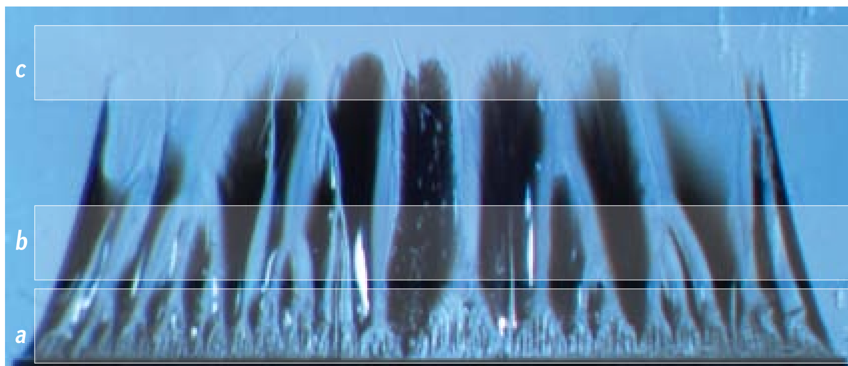
¿Cómo se fractura un sólido? La respuesta a esta pregunta depende, en primer lugar, del tipo de material. Nos centraremos aquí en los materiales frágiles como el vidrio o el polimetilmetacrilato. La fractura depende también de la geometría del sólido y de las tensiones aplicadas. Cuando tensamos un trozo de material frágil con geometría cilíndrica o plana se establece una distribución de tensiones en el interior que depende de su forma y, por supuesto, de la tensión ejercida. Cuando la tensión acumulada en algún punto del sólido supera la tensión de rotura del material, se inicia la fractura del cuerpo. Cuando las tensiones son simples, la fractura se propaga a lo largo del plano perpendicular a la tensión ejercida. En el caso de tensiones mixtas (tensión combinada con torsión, por ejemplo), el frente de fractura es mucho más complejo. Las fracturas en modo mixto aparecen en multitud de contextos; aunque se comenzaron a estudiar hace ya más de medio siglo, todavía no se ha desarrollado ningún modelo teórico que describa su comportamiento.

El campo de fase

El principal obstáculo para entender la fractura en modo mixto reside en el hecho de que esta conjuga todas las dificultades mencionadas anteriormente. Constituye un problema de frontera libre, fuertemente no lineal, eminentemente tridimensional (por lo que las descripciones bidimensionales resultan insuficientes) y en el que operan escalas espaciotemporales muy variadas.

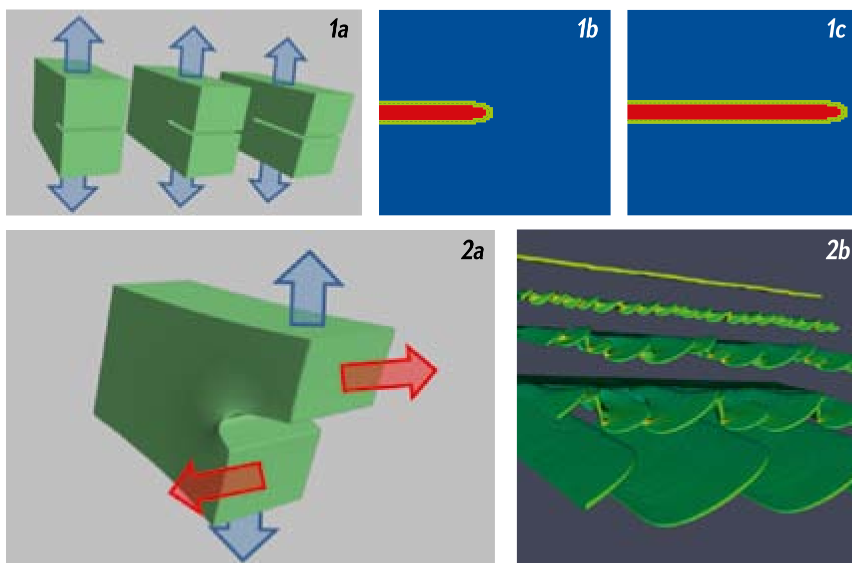
En colaboración con Alain Karma, de la Universidad Nororiental de Boston, hemos desarrollado un modelo teórico que permite describir ese tipo de fractura (los detalles del mismo se publicaron en marzo de 2010 en la revista *Nature*). El modelo se basa en una técnica matemática desarrollada en el contexto de la solidificación. Se trata de añadir un nuevo ingrediente a los modelos de fractura de tipo macroscópico clásicos basados en la teoría de la elasticidad lineal. Este nuevo elemento, el campo de fase, incorpora la dinámica microscópica del problema, puesto que describe el nivel de rotura de los enlaces atómicos o moleculares que forman el sólido. El nuevo modelo no solo describe la distribución de tensiones que se establece en el sólido, sino también el grado de rotura de este en cada punto.

La principal ventaja de nuestra aproximación es que evita tener que localizar en todo momento la frontera que separa el sólido intacto y el roto, y que evoluciona conforme progresa la fractura. El campo de fase se encarga de localizar automáticamente esta frontera. Asimismo, aporta una segunda ventaja porque nos permite relacionar la energía elástica disponible en el sólido (introducida por las tensiones que ejercemos en el sistema) con el consumo de esta energía conforme se rompen los enlaces del sólido durante el proceso de fractura. Además, la distribución espacial del campo guarda una estrecha relación con la energía requerida para crear una superficie libre en un sólido (energía superficial).



Fractura en modo mixto de un trozo de polimetilmetacrilato. Avanza de abajo arriba: las estructuras microscópicas iniciales (*a*) van agregándose (*b*) hasta formar otras de mayor tamaño (*c*), visibles a simple vista.

CORTESÍA DE VÉRONIQUE LAZARUS



Arriba, evolución del campo de fase (*1b*) y (*1c*), o grado de rotura, durante la fractura de un sólido con geometría plana sometido a cierta tensión vertical (*1a*). El frente de fractura (*línea verde*) separa el material intacto (*azul*) del fracturado (*rojo*). Abajo, evolución del frente de fractura (*2b*), según el modelo de campo de fase, para un sólido con geometría plana sometido a una tensión en modo mixto (*2a*). El frente avanza hacia nosotros, como si saliera de la página; de ahí que las trazas verdes con perfil de diente de sierra (que corresponden a distintos momentos del proceso) sean cada vez más gruesas.

Aunque el modelo teórico es aplicable a cualquier tipo de fractura tridimensional, ha resultado de gran utilidad para comprender sobre todo las de modo mixto. No solo ha permitido describir la estructura de escala menor que aparece al principio del proceso y que ningún modelo teórico previo había sido capaz de determinar (porque requiere de la interacción de escalas para su correcta descripción) sino que, además, explica la agregación de estructuras observada en los experimentos, algo que las teorías previas ni siquiera se planteaban describir.

El futuro

Gracias a la capacidad de cálculo numérico, que resulta fundamental para resolver las ecuaciones de nuestro modelo, y al avance de numerosas técnicas experimentales asistidas por ordenador, nos hallamos en condiciones de obtener una comprensión de la fractura que no podíamos soñar hace tan solo un par de décadas.

Ya se están empezando a cosechar frutos notables, como el desarrollo de técnicas de control de la fractura de gran utilidad en el mundo de la nanotecnología y en el diseño de nuevos materiales.

Ese y otros ejemplos nos permiten tener la confianza en que, en el futuro, los científicos podrán desarrollar materiales con propiedades a la carta que continúen facilitando el avance de la sociedad.

—Antonio J. Pons Rivero
Departamento de física e ingeniería nuclear
Universidad Politécnica de Cataluña
Tarrasa

NANOTECNOLOGÍA

La máquina de escribir más pequeña del mundo

Un curioso efecto hasta ahora poco explorado podría cambiar la manera de almacenar información en las memorias digitales

Desde las pinturas rupestres hasta las modernas memorias digitales, la búsqueda de nuevos métodos para almacenar información ha reclamado siempre el interés de la humanidad. Hasta no hace mucho, toda la información era analógica, y diferentes contenidos se almacenaban en distintos soportes: grabábamos discos para guardar música, sacábamos fotografías para conservar imágenes o escribíamos libros para que nuestras ideas pasasen a la posteridad. Con la tecnología digital, esa separación ha desaparecido: toda la información se almacena en forma de bits, series de unos y ceros que la codifican en un «alfabeto» binario; similar a un código Morse, pero con la ventaja de que una misma tarjeta de memoria nos sirve para guardar una foto, un documento o una canción. O un buen número de ellas: un disco de un teraocteto puede almacenar 8.000.000.000.000 bits, una enorme cantidad de información en un espacio muy reducido.

Hoy en día, una parte muy activa de la física del estado sólido se dedica a investigar nuevos métodos para grabar bits de forma más eficiente y compacta. La primera idea —y aún la más usada— consiste en almacenarlos con ayuda de minúsculos imanes: según el polo norte apunte hacia un lado u otro, se lee un uno o un cero. Al aplicar un pequeño campo magnético (generado por un imán o por una corriente) los nanoimanes se reorientan y se «escriben» nuevos bits. Pero las alternativas abundan: casi cualquier material que pueda adoptar dos estados y que permita cambiar de uno a otro sirve como almacén de memoria.

Bits ferroeléctricos

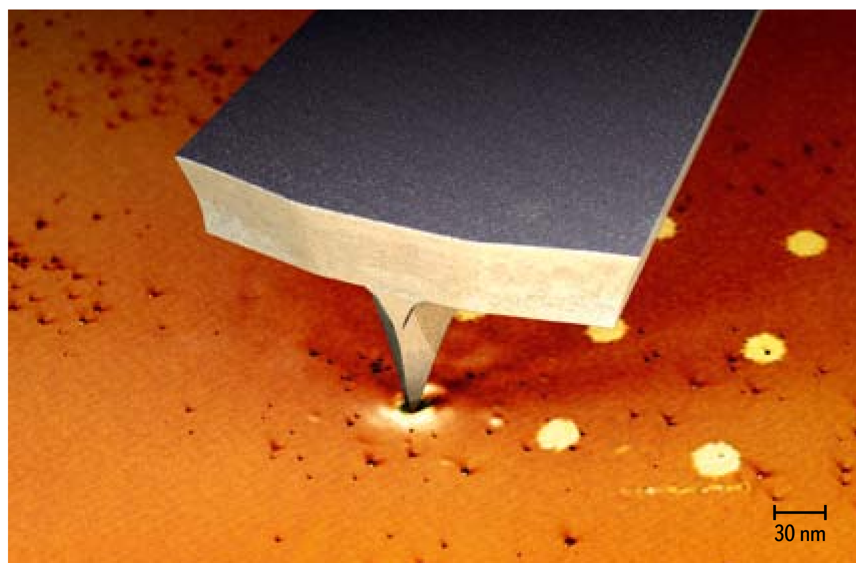
Un ejemplo de tales propiedades nos lo proporcionan los materiales ferroeléctricos. Al igual que los imanes, poseen un polo norte y un polo sur. Pero, a diferencia de aquellos, los polos no son magnéticos, sino eléctricos, lo cual significa que pueden escribirse por medio de un simple voltaje generado por una pila. Aunque en términos de popularidad aún distan mucho de las memorias magnéticas, ya se emplean para algunas aplicaciones, como en las tarjetas electrónicas del metro de Japón.

Pero la aplicación de un voltaje para escribir bits ferroeléctricos no se halla exenta de problemas. En láminas muy delgadas, los voltajes pueden causar pequeños cortocircuitos o corrientes de pérdida que calientan la muestra. Además,

ANTONIO J. PONS

aplicar un voltaje requiere añadir una capa metálica (electrodo) al dispositivo, lo cual desestabiliza la ferroelectricidad. Por tanto, una pregunta natural consiste en plantearse la posibilidad de escribir bits ferroeléctricos sin aplicar voltajes. La respuesta, según un artículo publicado el pasado mes de abril en la revista *Science* junto con Alexei Gruverman, de la Universidad de Nebraska-Lincoln, y otros colaboradores, es afirmativa.

Nuestro trabajo demostró la posibilidad de invertir la orientación de un dipolo ferroeléctrico sin más que apretar con cierto tipo de punzón muy afilado: la punta de un microscopio de fuerzas atómicas, cuyo diámetro asciende a unos escasos 10 nanómetros, o 10 millonésimas de milímetro. Al trabajar con una aguja tan fina, una fuerza diminuta genera una enorme presión sobre el área de contacto. En concreto, una masa de apenas un miligramo induce una presión de un gigapascal; el equivalente a concentrar el peso de cuatro elefantes adultos sobre una moneda de un euro. A pesar de su magnitud, sin embargo, ello no bastaría por sí solo para invertir la orientación de un dipolo eléctrico. La clave reside en que, al hallarse tan concentrada, la deformación producida no es homogénea. Y las diferencias en la deformación del material sí pueden invertir la polarización gracias a un mecanismo conocido como flexoelectricidad.



Vuelta al cincel: **Recreación por ordenador del efecto que ejerce la punta de un microscopio de fuerzas atómicas al ser aplicada sobre una superficie ferroeléctrica. Al apretar en un punto, la polarización del material queda invertida (*zonas blancas, el color es simulado*). El método podría encontrar aplicaciones para almacenar información en tarjetas de memoria eléctricas (en lugar de magnéticas) sin necesidad de aplicar voltajes.**

La flexoelectricidad fue descubierta hace casi medio siglo en la Unión Soviética. Pero, al tratarse de un efecto de proporciones modestas, quedó relegada durante decenios al cajón de las curiosidades académicas. A escalas nanométricas, sin embargo, los gradientes pueden ser enormes, por lo que todo efecto que dependa de ellos —como la flexoelectricidad— puede ver multiplicada su magnitud en similares proporciones. El control de la polarización en memorias ferroeléctricas recién demostrado constituye un buen ejemplo de ello.

Aún quedan varios problemas técnicos por resolver antes de que el descubrimiento pueda trasladarse a un dispositivo real. Uno de ellos se debe a que la punta solo puede señalar en una dirección, por lo que la polarización puede pasar de estar dirigida hacia arriba a estarlo hacia abajo, pero no a la inversa. Ello significa que, de momento, podemos escribir bits gracias a la flexoelectricidad, pero no borrarlos. Pese a todo, el mecanismo no se antoja completamente descabellado ni la idea completamente nueva: al convertir la presión mecánica en información, la flexoelectricidad replica, a escala nanoscópica, el funcionamiento de una máquina de escribir.

—Gustau Catalan
Investigador ICREA
Centro de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología (CIN2-CSIC)
Barcelona

QUÍMICA FÍSICA

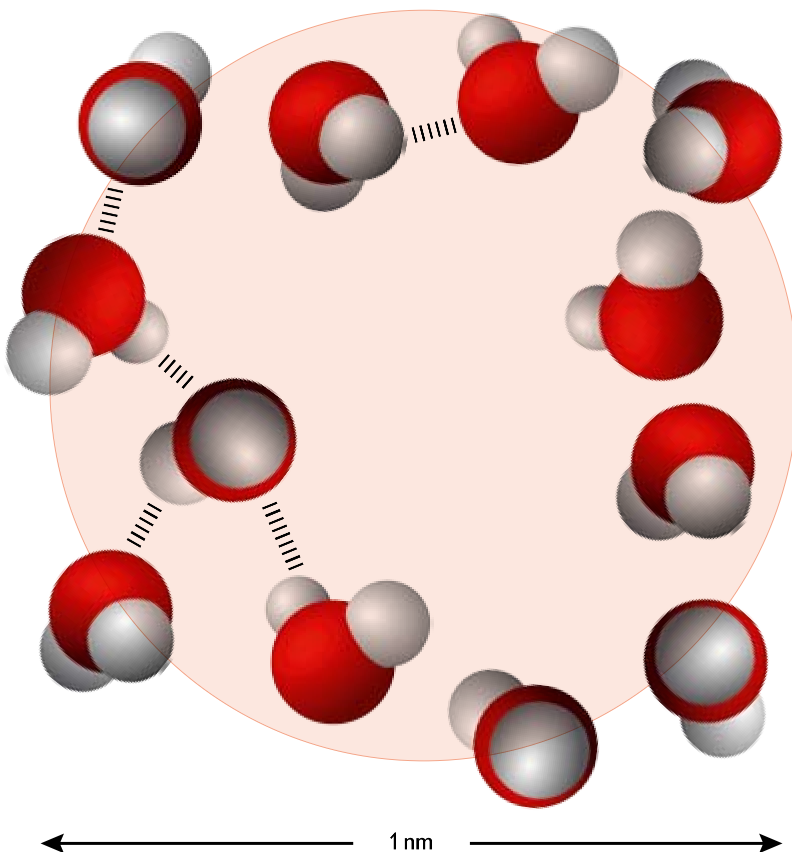
La danza del agua en los nanocanales

Cooperación y desorden en la difusión del agua

El agua es una sustancia peculiar. Hasta la fecha, se han documentado en ella no menos de 67 propiedades anómalas, la más conocida de las cuales quizá sea el aumento de volumen que experimenta cuando se enfría por debajo de los 4 grados centígrados. A ello se debe que las tuberías revienten en invierno, que el iceberg que hundió el *Titanic* flotase, o que el mar y los lagos se congelen desde la superficie hacia el fondo, gracias a lo cual la vida continúa en el agua que permanece líquida bajo el hielo. En un trabajo reciente publicado en *Physical Review E* en enero de 2012 hemos hallado la relación que guarda otra de las extrañas propiedades de este líquido con la física que gobierna su difusión a través de canales de escala nanométrica. El descubrimiento podría ayudar a mejorar los procesos de filtración y desalinización.

Para desalinizar el agua es necesario filtrarla a través de canales microscópicos. Pero, como cabría esperar, el líquido se mueve con mayor dificultad a medida que disminuye el diámetro de dichos canales, lo que entorpece y ralentiza el proceso. La solución a este problema llega por medio de una vía inesperada: el agua vuelve a fluir con facilidad cuando el diámetro del canal se hace inferior a un nanómetro, la cienmilésima parte del diámetro de un cabello, o el tamaño aproximado de tres moléculas de agua alineadas. La aplicación de este resultado podría multiplicar por mil la veloci-

CORTESÍA DE JOEL BREHM Y ALEXEI GRVERMAN, UNIVERSIDAD DE NEBRASKA-LINCOLN



Líquido anómalo: **Al fluir, las moléculas de agua se organizan en regiones de casi un nanómetro de diámetro en las que unas 12 moléculas se mueven de manera coordinada gracias al establecimiento de enlaces por puente de hidrógeno (*líneas discontinuas*). Tales regiones cooperativas permiten explicar las peculiares propiedades de difusión del líquido.**

CORTESÍA DE LOS AUTORES, UNIVERSIDAD DE GRANADA/UNIVERSIDAD DE BARCELONA

dad de desalinización de las membranas actuales.

¿Cómo explicar que la movilidad del agua aumente cuando se filtra a través de canales tan finos? Por regla general, las moléculas de un líquido experimentan mayores dificultades para avanzar a medida que este se comprime. Sin embargo, bajo un amplio régimen de presiones, al agua le sucede justamente lo contrario. Esta y otras peculiaridades del disolvente universal se deben a que sus moléculas pueden coexistir en diversas disposiciones microscópicas: por un lado, pueden distribuirse de manera ordenada en una configuración de densidad baja; por otro, pueden adoptar una distribución desordenada, caracterizada por una densidad mayor. La aparición de tales estructuras se debe a la formación de enlaces por puente de hidrógeno (originados por la atracción que experimenta el átomo de hidrógeno de una molécula con uno de los átomos de oxígeno de la molécula vecina), un tipo de enlace cuyas propiedades cuánticas aún carecen de explicación satisfactoria [*véase* «Agua. El enlace de hidrógeno», por José Teixeira; Investigación y Ciencia, diciembre de 2000].

Regiones cooperativas

A temperaturas y presiones reducidas, cada molécula de agua forma un promedio de cuatro enlaces por puente de hidrógeno con otras tantas vecinas. Estas tratan de alejarse lo más posible unas de otras, por lo que tienden a colocarse en los vértices de un tetraedro regular. Dicho orden resulta máximo en el hielo, en el que cada molécula se comporta como una acróbata que aguanta con firmeza a sus cuatro vecinas.

También el estado líquido exhibe cierto grado de orden. Sin embargo, este se asemeja más a un baile en el que cada molécula se encuentra unida en promedio a otras cuatro, pero en el que cambia sin cesar de compañera. Al aumentar la presión del líquido, se incrementa también su densidad, hasta que llega un momen-

to en el que cada molécula posee más de cuatro vecinas y no sabe a cuál de ellas unirse en su danza. De este modo, el intercambio de parejas se torna más rápido (cada 10^{-12} segundos) y mejora la difusión. A presiones aún más elevadas, no obstante, las moléculas se encuentran tan próximas unas a otras que más bien parecen pasajeros en el metro a la hora punta: se empujan en todas direcciones y se obstaculizan el paso unas a otras. Como resultado, la difusión media disminuye.

La situación se complica aún más en canales muy estrechos, como los que podemos encontrar en el interior de las células, en plantas, rocas y también en los nuevos materiales nanoscópicos, como los nanotubos de carbono, fabricados hoy en día a gran escala con miras a todo tipo de aplicaciones.

Mediante cálculos analíticos y simulaciones por ordenador demostramos que, para fluir, las moléculas de agua han de moverse de manera coordinada en regiones de casi un nanómetro de diámetro que albergan unas 12 moléculas. Este resultado aparece como consecuencia de la cooperación entre los enlaces por puente de hidrógeno. En canales de anchura superior al nanómetro, las moléculas danzan juntas en las regiones cooperativas. Pero, conforme un conducto se torna más estrecho, esos agregados ven limitados sus movimientos, de manera que una restricción del espacio disponible dificulta la difusión. Sin embargo, cuando los canales miden menos de un nanómetro de diámetro, el número de elementos en los agregados disminuye de manera progresiva hasta reducirse a moléculas aisladas, las cuales se difunden con mayor rapidez, aunque dispongan de menos espacio.

Nuestros cálculos encajan con los resultados experimentales que R. R. Nair y sus colaboradores, de la Universidad de Manchester, y S. Karan y su grupo, del Instituto Nacional de Ciencia de Materiales de Japón, publicaron en la revista *Science* en enero de 2012. Dichos estudios consideraban la permeabilidad de ciertas membranas de óxido de grafeno y de carbono amorfo. Aunque estas impiden el paso de todo tipo de líquidos y gases, los investigadores observaron que el agua fluía a través de ellas casi con total libertad, hasta 10^{10} veces más rápido que el helio. Esta sorprendente propiedad puede explicarse a partir de la estructura microscópica de dichas membranas: el diámetro de sus intersticios asciende, de hecho, a un nanómetro.

—Francisco de los Santos
Departamento de electromagnetismo y física de la materia
Universidad de Granada
—Giancarlo Franzese
Departamento de física fundamental
Universidad de Barcelona

NANOTECNOLOGÍA

Nuevos biosensores nanomecánicos

La progresiva miniaturización de los dispositivos electromecánicos abre nuevas perspectivas en biología

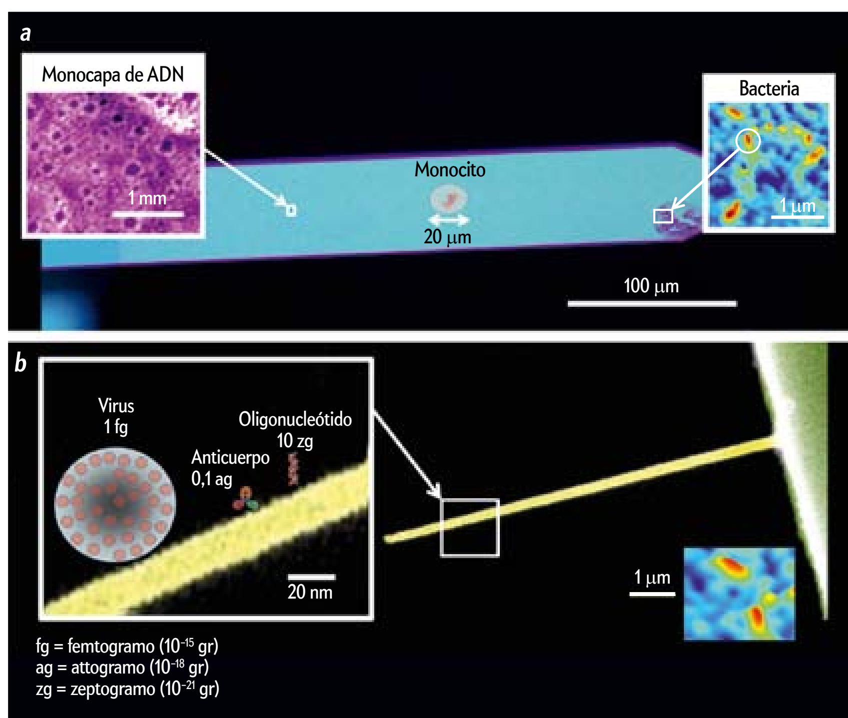
Los microscopios de fuerza atómica constituyen una de las herramientas más empleadas en la exploración del nanomundo. Basados en un principio de funcionamiento similar al de un tocadiscos, permiten rastrear y resolver con gran precisión los detalles de una superficie a escala nanométrica. En 1994, varios trabajos casi simultáneos demostraron que los mismos elementos que otorgaban a este instrumento su exquisita sensibilidad podían emplearse como una nueva herramienta sensora de aplicaciones casi infinitas. Nos referimos a las micropalancas, pequeñas estructuras mecánicas con forma de trampolín que, al interaccionar con otras sustancias, ven modificadas algunas de sus propiedades, como su masa o su forma. Ahora, una nueva generación de dispositivos aún más diminutos promete un abanico de aplicaciones insospechadas en biología y medicina.

Las micropalancas suelen fabricarse con materiales semiconductores —con el silicio como gran favorito— y con un espesor muy inferior a su anchura o su longitud; las proporciones 1:50:400 corresponden al diseño más empleado. Gozan de una enorme sensibilidad para medir propiedades a escalas microscópicas: detectan fuerzas inferiores al nanonewton, variaciones de temperatura de 0,01 grados y masas añadidas a su superficie del orden de picogramos, el equivalente a tres bacterias *E. coli*. Además, presentan la ventaja de no requerir marcadores fluorescentes. Pero quizá la característica más atractiva de estos dispositivos resida en su gran versatilidad. Sus aplicaciones incluyen la detección de gases, la clasificación de microorganismos, la capacidad para distinguir entre secuencias de ADN y la detección de drogas, pesticidas, explosivos y medicamentos. En biología, los logros cosechados por estos sensores han sido más que notables. Entre ellos cabe destacar la detección reciente de más de 50 organismos y sustancias químicas, una lista que previsiblemente aumentará a medida que se sucedan los avances en sensibilidad, reproducibilidad y número de análisis por minuto.

Salto cualitativo

Durante los últimos años, sin embargo, las micropalancas han sido reemplazadas por nanohilos de silicio. Ello no solo ha disparado los umbrales de detección a masas del orden del femtogramo (el equivalente a una hebra de ADN o a una proteína), sino que ha abierto un camino insospechado en el desarrollo de los biosensores nanomecánicos. Hasta la fecha, estos dispositivos se consideraban sucesores de otros sistemas de medición de masa, como la balanza de cuarzo, sustitutos potenciales de algunas técnicas de inmunoensayo, como el ELISA (ensayo por inmunoabsorción ligado a enzimas), o de las micromatrices de ADN y proteínas. Pero la nueva miniaturización lograda con nanohilos y nanotubos se postula como algo más: el futuro de la espectrometría de masas. Una nueva clase de espectroscopía que permite, además, acceder al estudio de los cambios en las propiedades elásticas de los materiales.

Tal y como propusimos en un artículo publicado junto con otros colaboradores en agosto de 2010 en la revista *Nature Nanotechnology*, empleados como resonadores mecánicos, los nanohilos de silicio acoplados optomecánicamente a una fuente de luz láser han logrado detectar masas del orden del femtogramo, al tiempo que han alcanzado el límite de 0,1 kilopascales por femtogramo en la determinación del módulo de Young, el parámetro que mide la elasticidad de un material. Esto significa que la técnica podría llegar a detectar variaciones de cien



SHEILA GONZÁLEZ (*monocapa de ADN*), MONSERRAT CALLEJA (*monocito, micropalanca, virus, anticuerpo y oligonucleótido*), MARIO ENCINAR Y ALICIA CALZADO (*bacterias*), ÁLVARO SAN PAULO (*nanohilo*); GRUPO DE BIONANOMECÁNICA, INSTITUTO DE MICROELECTRÓNICA DE MADRID, CSIC

Sensores nanomecánicos: En *a* se muestra un dispositivo comercial compuesto de una micropalanca de silicio de 400 micrómetros de largo y 1 micrómetro de espesor. La imagen de la capa de ADN se ha obtenido mediante un microscopio de fuerza atómica que empleaba una micropalanca como la de la imagen, pero con una punta afilada en su extremo para rastrear la superficie. En *b*, un sensor nanomecánico miniaturizado formado por un nanohilo de silicio de 20 nanómetros de diámetro y 10 micrómetros de largo. La imagen muestra la escala relativa de varias muestras características.

partes por millón en el módulo de Young de una proteína. Hoy sabemos que esta clase de propiedades mecánicas desempeña un papel crucial en un gran número de procesos biológicos y enfermedades: una sola mutación en las proteínas que encapsulan algunos virus puede llegar a cambiar su elasticidad y convertirlo en un patógeno más invasivo. Los últimos avances en el campo de la detección de propiedades biológicas han sido descritos por nuestro grupo de investigación en un reciente artículo de revisión publicado en *Nanoscale* el pasado mes de junio.

La técnica promete, asimismo, aplicaciones novedosas a escala micrométrica, la escala de la biología celular. Estudios recientes han demostrado que la rigidez reviste tanta importancia en los seres vivos que bien podría constituir un nuevo biomarcador: un indicador de la salud celular. Las células se comunican mediante señales mecanoquímicas; en este contexto, los sensores nanomecánicos se perfilan como candidatos idóneos para traducir las vibraciones de la célula en una señal medible.

—Montserrat Calleja, Priscila Kosaka, Sheila González y Javier Tamayo
Instituto de Microelectrónica de Madrid CSIC

FÍSICA DE PARTÍCULAS

LA VIDA INTERIOR DE LOS QUARKS

¿Qué ocurriría si las partículas que creemos elementales poseyesen estructura interna?

Don Lincoln

CRAIG CUTLER





Don Lincoln trabaja como investigador en el laboratorio Fermilab, cerca de Chicago, donde ha estudiado durante años la posible subestructura de quarks y leptones.



EL UNIVERSO ES UN LUGAR COMPLEJO E INTRINCADO.

Podemos movernos a través del aire con suma facilidad, pero no a través de una pared. El Sol transmuta un elemento químico en otro, al tiempo que baña nuestro planeta con calor y luz. Las ondas de radio han llevado la voz de un hombre desde la Luna hasta la Tierra, pero los rayos gamma resultan fatales para nuestro ADN. Parecería que tales fenómenos carecen de conexión mutua. Sin embargo, los físicos han logrado conjugar un puñado de principios en una teoría de simplicidad sublime que explica todos los procesos anteriores y un sinnúmero de ellos más. Dicha teoría, bautizada como modelo estándar de la física de partículas, engloba la interacción electromagnética (la responsable de la solidez de las paredes), las fuerzas nucleares (que rigen los procesos que acontecen en el interior del Sol) y la propagación de las ondas de radio y los rayos gamma.

El modelo estándar constituye una de las teorías más impactantes y exitosas jamás concebidas. En esencia, postula que toda la materia se compone de dos tipos de partículas, quarks y leptones, ambos indivisibles. Los quarks se agregan para formar protones y neutrones. El más popular de todos los leptones es el electrón. Combinados de la manera correcta, tales partículas nos permiten «construir» cualquier átomo y, por extensión, toda la materia conocida. Esos constituyentes de la materia interaccionan por medio de cuatro fuerzas fundamentales: la gravedad y el electromagnetismo, conocidas por todos, y las interacciones nucleares fuertes y débiles, menos familiares. El intercambio de cierto tipo de partículas, los bosones, explica la transmisión de las tres últimas interacciones. Hasta ahora, sin embargo, todos los intentos de describir la gravedad a escala microscópica han fallado.

A pesar de sus éxitos, el modelo estándar deja varias preguntas sin resolver. ¿Por qué existen cuatro interacciones, y no más o menos? ¿A qué se debe que haya dos grandes grupos de partícu-

EN SÍNTESIS

Las partículas fundamentales conocidas se agrupan en tres generaciones con propiedades similares. Al igual que ocurre con los elementos químicos, tales pautas podrían deberse a la existencia de una estructura interna.

Los hipotéticos componentes de quarks y leptones reciben el nombre genérico de *preones*. Hasta la fecha se han propuesto varios modelos teóricos para explicarlos, si bien aún no hay indicios empíricos de su existencia.

Tales pruebas quizás aparezcan al estudiar el momento magnético del muon o las desintegraciones exóticas de dicha partícula. En los próximos años, el LHC del CERN y otros experimentos podrían zanjar la cuestión.

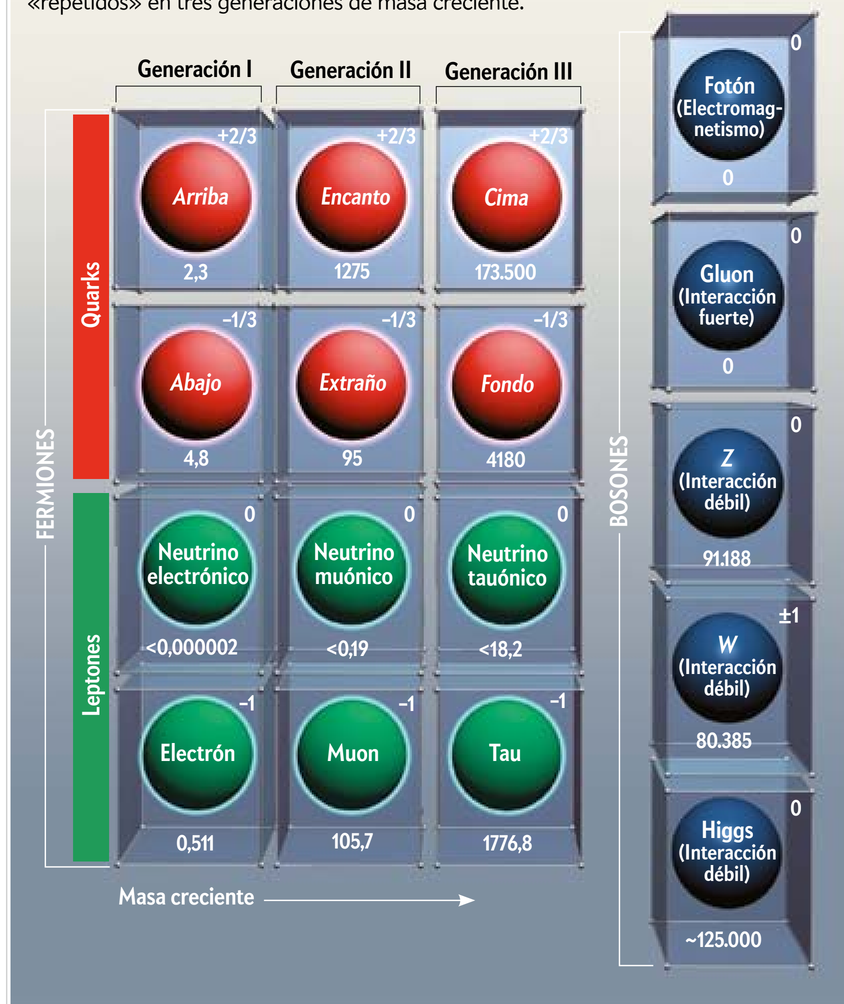
las, en lugar de uno solo? Tales problemas resultan interesantes, sin duda. Sin embargo, es otro rompecabezas el que, desde hace algún tiempo, viene ocupando mi atención y la de otros investigadores. Aunque según el modelo estándar quarks y leptones serían indivisibles, existen indicios que sugieren que tal vez se trate de objetos compuestos. De ser el caso, ello nos obligaría a revisar nuestras teorías físicas. Al igual que la energía nuclear resultaba inconcebible antes de que Ernest Rutherford descubriese la estructura interior del átomo en 1911, la aparición de otra capa de la cebolla subatómica nos revelaría fenómenos que, hoy por hoy, no podemos imaginar.

Para responder a tales cuestiones por medio de los experimentos, debemos hacer colisionar partículas a energías extremadamente elevadas. Desde el descubrimiento de los quarks, allá por los años setenta, hemos echado en falta herramientas que nos permitiesen espiar en su interior. Sin embargo, el Gran Acelerador de Hadrones (LHC) del CERN, cerca de Ginebra, tal vez se encuentre a la altura de semejante tarea.

MODELO ESTÁNDAR

La tabla periódica de las partículas subatómicas

El modelo estándar describe de manera satisfactoria todas las partículas subatómicas conocidas y las interacciones que median entre ellas. Cada partícula pertenece a uno de dos grandes grupos: los fermiones, a los que pertenecen los constituyentes de la materia (quarks y leptones), y los bosones, que comprenden las partículas transmisoras de las interacciones. Los primeros existen «repetidos» en tres generaciones de masa creciente.



EL PROBLEMA DE LAS GENERACIONES

Las primeras pistas acerca de una posible estructura interna de quarks y leptones provienen de un viejo problema, aún sin resolver, relacionado con el número de quarks y leptones descubiertos hasta ahora. Hoy sabemos que los protones y los neutrones se encuentran formados por dos tipos de quarks, denominados *arriba* y *abajo*. El primero de ellos posee carga eléctrica igual a +2/3 (en unidades de la carga del protón); el segundo, –1/3. Aunque estos dos tipos de quarks bastan para construir toda la materia ordinaria del universo, por algún extraño motivo existen quarks de otras clases: el quark *extraño* posee la misma carga eléctrica que el quark *abajo*, pero una masa mayor; a su vez, el quark *fondo* constituye una versión aún más masiva de los anteriores. De la misma forma, los quarks *encanto* y *cima* corresponden a versiones cada vez más pesadas del quark *arriba*. Todos ellos se han observado en el laboratorio. Una vez creados, sin embargo, los cuatro quarks de mayor masa tardan una ínfima fracción de segundo en desintegrarse en otras partículas, entre las que se incluyen los dos quarks más ligeros.

También el electrón posee dos hermanos inestables y de mayor masa: los leptones mu y tau, ambos con la misma carga que el electrón. El zoo de partículas conocidas incluye asimismo tres versiones de neutrinos, todos ellos muy ligeros y carentes de carga eléctrica.

Semejante cornucopia de partículas ha suscitado la siguiente pregunta, muy natural para un físico: si los quarks *arriba*, *abajo* y el electrón bastan para construir el universo que conocemos, ¿qué función desempeña el resto? La cuestión puede resumirse en la célebre frase pronunciada por un premio nóbel al enterarse de la existencia del muon: «¿Quién ha pedido esto?».

Para entender tal abundancia de partículas, podemos comenzar por construir una tabla que resuma todas sus propiedades, en analogía con la tabla periódica de los elementos químicos. A fin de cuentas, fue esta última la que proporcionó las primeras pistas sobre la naturaleza compuesta de los átomos: las propiedades comunes a los elementos de una misma columna podían explicarse en términos de la estructura interna de los átomos.

MALCOLM GODWIN

La tabla de quarks y leptones exhibe tres columnas, llamadas generaciones; de ahí que el misterio sobre su número se conozca como «problema de las generaciones». La primera de ellas incluye los quarks *arriba* y *abajo*, el electrón y el neutrino electrónico; todo lo que necesitamos para explicar el universo ordinario. La segunda contiene las versiones algo más masivas de las partículas de la primera generación, mientras que la tercera incluye las versiones de mayor masa.

Según el modelo estándar, quarks y leptones son partículas puntuales carentes de subestructura. Con todo —y al igual que sucede con la tabla periódica de los elementos—, las pautas que observamos en ellas dejan abierta la posibilidad a que las distintas generaciones aparezcan como consecuencia de la estructura interna de quarks y leptones.

Otro precedente histórico relevante lo hallamos en el descubrimiento, a principios del siglo xx, de las desintegraciones radiactivas. Algún proceso, desconocido en aquella época, permitía que un elemento se transmutase en otro. Hoy sabemos que, si alteramos el número de protones y neutrones presentes en el núcleo atómico, el sueño medieval de convertir el plomo en oro puede hacerse realidad. Las posibilidades que nos brindan tales mecanismos resultan incluso mayores, ya que la alquimia nuclear permite transformar un protón en un neutrón (o a la inversa) si intercambiamos la identidad de los quarks que los componen. Estas transformaciones ocurren gracias a la interacción nuclear débil, que también media el cambio de identidad de los leptones (si bien quarks y leptones no pueden transformarse unos en otros). Al igual que la transmutación de un elemento químico en otro obedece a los cambios que experimentan las partículas que componen el átomo, tal vez la metamorfosis de quarks y leptones obedezca a una estructura interna de estas partículas.

PREONES

Recetario de partículas

Se han propuesto varios modelos de preones, los hipotéticos constituyentes de las partículas subatómicas conocidas. Uno de ellos fue el concebido en 1979 por Haim Harari, por entonces en el Acelerador Lineal de Stanford, y Michael A. Shupe, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Su propuesta incluía dos tipos de preones y sus correspondientes antipartículas. Estos se agruparían de la manera descrita en esta tabla para formar las partículas de materia, o fermiones (*arriba*), así como los bosones mediadores de las interacciones elementales (*abajo*).

Partículas de materia (fermiones)

Los dos preones del modelo de Harari y Shupe pueden representarse como + y 0. El preón + posee carga +1/3; el 0 carece de carga eléctrica. Sus correspondientes antipartículas, − y $\bar{0}$, tienen carga opuesta (-1/3 y 0). Cada quark y cada leptón se compone de tres preones.

CARGA	CONTENIDO DE PREONES	PARTÍCULA
+1	+ + +	Positrón
+2/3	+ + 0	Quark *arriba*
+1/3	+ 0 0	Antiquark *abajo*
0	0 0 0	Neutrino electrónico
0	$\bar{0}\,\bar{0}\,\bar{0}$	Antineutrino electrónico
−1/3	$-\,\bar{0}\,\bar{0}$	Quark *abajo*
−2/3	$-\,-\,\bar{0}$	Antiquark *arriba*
−1	− − −	Electrón

Partículas mediadoras de las interacciones (bosones)

En grupos de dos y seis, los mismos preones pueden describir los bosones transmisores de las interacciones fundamentales: el electromagnetismo (mediado por el fotón), la interacción fuerte (gluones) y la débil (bosones W^+, W^- y Z). La composición de los gluones en términos de preones reviste mayor complejidad, por lo que se omiten aquí.

CARGA	CONTENIDO DE PREONES	PARTÍCULA
+1	+ + + 0 0 0	Bosón W^+
−1	$-\,-\,-\,\bar{0}\,\bar{0}\,\bar{0}$	Bosón W^-
0	$0\,0\,0\,\bar{0}\,\bar{0}\,\bar{0}$ + + + − − − $+\,+\,-\,-\,0\,\bar{0}$ $+\,-\,0\,\bar{0}\,0\,\bar{0}$	Bosón Z (cuatro versiones)
0	+ −	Fotón

MALCOLM GODWIN

PARTE Y PARTÍCULA

Se han propuesto varios hipotéticos «ladrillos» de quarks y leptones. Poseen varios nombres, pero el término *preón* ha acabado calando como denominador común de todos ellos. En la mayoría de los casos, el mismo nombre se usa para los presuntos constituyentes de los bosones mediadores de las interacciones fundamentales.

Tomemos como ejemplo el modelo propuesto en 1979 por Haim Harari, por aquel entonces en el Acelerador Lineal de Stanford, y, de manera independiente, por Michael A. Shupe, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. En 1981, Harari extendió dicho modelo con la ayuda de su estudiante, Nathan Seiberg, en la época en la que ambos investigaban en el Instituto Científico Weizmann de Rejóvot, en Israel. Su propuesta contempla dos tipos de preones, uno con carga +1/3 y otro con carga nula. Ambos son fermiones y poseen sus correspondientes antipartículas, de cargas −1/3 y cero. Cada quark o leptón quedaría compuesto por una combinación única de tres preones. El quark *arriba*, por ejemplo, estaría formado por dos preones de carga +1/3 y uno de carga nula; su antipartícula, por dos preones de carga −1/3 y uno de carga nula. Cada uno de los bosones que median las interacciones fundamentales se correspondería con una combinación única de seis preones. Así, el bosón W^+ (con carga eléctrica +1), que interacciona tanto con quarks como con leptones, se encontraría formado por tres preones de carga +1/3 y tres de carga nula.

Partiendo de un conjunto de hipótesis razonables, Harari y Shupe postularon el contenido de preones de todas las partículas de la primera generación. Esos mismos preones compondrían también los gluones (los transmisores de la interacción nuclear fuerte, que une a proto-

nes y neutrones en el núcleo atómico) y el resto de los bosones conocidos.

Todo modelo que aspire a describir la estructura interna de quarks, leptones y bosones debe hacer frente a una dificultad: reproducir con acierto la gran cantidad de interacciones posibles entre partículas. De hecho, los preones proporcionarían el «lenguaje» para describir los procesos subatómicos. Consideremos la colisión entre un quark *arriba* y un antiquark *abajo* para fusionarse en un bosón *W*, el cual se desintegra después en un positrón (la antipartícula del electrón) y un neutrino electrónico. En el modelo de preones de Harari y Shupe, los tres preones que conforman cada uno de los quarks se unen para dar lugar a un bosón *W*, compuesto por tres preones de carga +1/3 y tres preones neutros. Después, esos seis preones se repartirían de acuerdo con la siguiente configuración: tres preones de carga +1/3, que compondrían el positrón, y tres preones neutros, que darían lugar al neutrino electrónico.

Hasta ahora nos hemos limitado a hacer lo que podríamos llamar numerología de quarks y leptones; un juego similar a ajustar reacciones químicas o ecuaciones matemáticas. Sin embargo, un modelo de preones debería explicar las propiedades de las partículas a partir de unos pocos ladrillos elementales y unas pocas reglas. Buscamos un orden subyacente que nos permita unificar un conjunto de partículas en apariencia distintas, no una colección de definiciones *ad hoc* con reglas específicas para cada caso. Tanto la propuesta de Harari y Shupe como otros modelos alternativos han logrado dar con una explicación de tales características.

El lector se habrá percatado de que hasta ahora nos hemos limitado a discutir la primera generación de quarks y leptones. El asunto se complica cuando intentamos describir la segunda y la tercera generación. En el modelo de Harari y Shupe, estas se corresponden con estados excitados de las configuraciones que dan cuenta de la primera de ellas. Al igual que el electrón de un átomo puede saltar de un nivel energético a otro, algún mecanismo desconocido ha de ligar a los preones en el interior de las partículas de tal modo que las distintas generaciones surjan a partir de los mismos constituyentes.

Puede que semejante explicación parezca sacada de la chistera. De hecho, así es: aún faltan numerosos detalles por completar. Pero los estudios teóricos que en su día condujeron al modelo de quarks adolecían de un nivel similar de complejidad. La descripción matemática de la interacción fuerte, la que mantiene a los quarks confinados en el interior de los protones y los neutrones, solo llegó más tarde. Aun así, el problema de las generaciones sigue sin explicación. Al respecto se han propuesto varios modelos, incluido uno en el que cada preón lleva asociado un nuevo número «generacional» y una nueva carga, el hipercolor, que liga a los preones en el interior de quarks y leptones.

Aunque aquí solo hemos esbozado una teoría de preones, no se trata ni mucho menos de la única. Se han escrito cientos de artículos que consideran diferentes modelos de preones, si bien la mayoría de ellos describen ligeras variaciones de unas pocas propuestas básicas. Algunos contemplan preones con carga 1/6, en vez de 1/3; en otros, los quarks se componen de cinco preones, en lugar de tres. Ciertos modelos proponen la existencia de preones fermiónicos y bosónicos, o un contenido de preones distinto del expuesto aquí para los bosones transmisores de las interacciones fundamentales. Las alternativas abundan, por lo que necesitamos datos para descartar algunas de ellas.

La radiactividad no logró entenderse hasta que no se descubrió la estructura interna de los átomos. Quizá suceda algo similar con las partículas e interacciones fundamentales

Mas allá de la fascinación que despierta la posibilidad de que las partículas conocidas se encuentren formadas por otras aún más diminutas, buena parte de los investigadores del ramo encuentran los preones interesantes por otras razones. Si existen, podrían decirnos algo sobre otro de los grandes misterios de la física de partículas. El modelo estándar postula que el campo de Higgs dota de masa a las partículas fundamentales, las cuales experimentarían una especie de «frenado» al moverse en el seno de este campo ubicuo. En cambio, las partículas de masa nula, como el fotón, lo atraviesan sin inmutarse. Si los preones que forman la primera generación de partículas son los mismos que componen la segunda y tercera, parece probable que gocen de alguna propiedad que provoque que las partículas pertenecientes a la segunda y tercera generación interaccionen con mayor intensidad con el campo de Higgs. El mecanismo de Higgs da cuenta de la masa de las partículas fundamentales, pero no predice sus valores.

Hasta que no formulemos una teoría más profunda, la masa de las partículas subatómicas solo podrá determinarse midiéndolas una a una. Pero cabe aventurar que, si descubriésemos la estructura interna de quarks y leptones, aumentaría nuestra comprensión del mecanismo de Higgs.

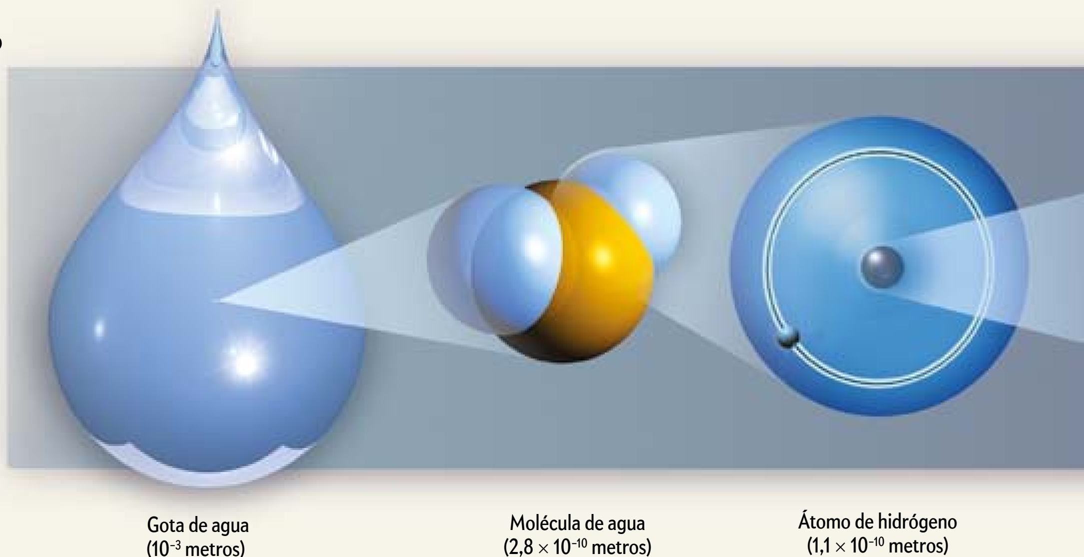
UN CAMINO TORTUOSO

Los modelos de preones no se encuentran exentos de problemas. En primer lugar, todos los intentos por observarlos han fallado. Aunque se trata sin duda de algo decepcionante, dicho fracaso podría deberse a la falta del equipo experimental adecuado. Pero, aparte de este problema empírico, los preones plantean también dificultades de carácter teórico. Una característica general de las teorías confinantes (llamadas así porque, en este caso, los preones se hallan confinados en el interior de quarks y leptones) reside en que la masa de las partículas resulta inversamente proporcional a la escala de confinamiento. Dado que quarks y leptones son mucho menores que el protón o el neutrón, esta regla implica que un quark (compuesto por preones confinados) debería ser mucho más masivo que un protón (formado a su vez por quarks). Por tanto, un protón pesaría menos que la suma de sus partes; de hecho, menos que cada uno de sus componentes.

Aunque el problema parezca imposible de superar, obstáculos similares ya han sido superados en el pasado. Un quark y un antiquark pueden unirse para formar cierto bosón, denominado mesón pi. En el contexto de las teorías confinantes, el mesón pi planteaba un problema parecido al mencionado arriba. Sin embargo, gracias a una idea propuesta en 1961 por Jeffrey Goldstone, por entonces en el CERN, los teóricos se percataron de que tales dificultades podían resolverse echando mano de las simetrías de la teoría, gracias a lo cual la exigua masa del mesón pi dejó de resultar sorprendente. Por desgracia, el argumento solo puede aplicarse a los bosones, no a los fermiones. Sin embargo, en 1979, el físico de la Universidad de Utrecht Gerard 't Hooft halló un esquema parecido para el caso de los fermiones. Hoy

10^{15} aumentos

En caso de existir, los preones han de poseer un tamaño diminuto, inferior al de los quarks. Todos los experimentos realizados hasta la fecha parecen indicar que los quarks son partículas puntuales, lo cual contradiría la existencia de una estructura interna. Los experimentos futuros intentarán verificar la naturaleza puntual de quarks y leptones.



por hoy ignoramos si la solución propuesta por 't Hooft coincide con la elegida por las partículas de la naturaleza; pero, al menos, tales ideas han servido para demostrar que el problema de la masa de los quarks puede superarse.

Los preones no proporcionan la única posibilidad para intentar resolver el problema de las generaciones. Una de las alternativas más conocidas nos la ofrece la teoría de cuerdas, según la cual los constituyentes últimos de la materia no son partículas, sino minúsculas cuerdas vibrantes. A modo de metáfora, podemos imaginar cada partícula del modelo estándar como una cuerda que suena con cierta nota, y el universo, como una inmensa orquesta interpretando una gran sinfonía cósmica. Por fortuna, cuerdas y preones pueden convivir sin problemas, ya que la escala de aquellas resulta muy inferior a la de quarks y leptones. Si las cuerdas existen, sus «notas» bien podrían corresponderse no con quarks y leptones, sino con preones, pre-preones o incluso partículas aún más elementales.

Otra alternativa llegó en 2005, cuando Sundance Bilson-Thompson, de la Universidad de Adelaide, en Australia, concibió un modelo en el que los preones eran «trenzas» de espaciotiempo. Aunque la propuesta se encuentra aún en su infancia, algunos autores ya han comenzado a explorar sus implicaciones. En particular, dicha teoría ofrece una posibilidad de incluir la deseada gravitación cuántica en el marco del modelo estándar.

PREONES EN EL LABORATORIO

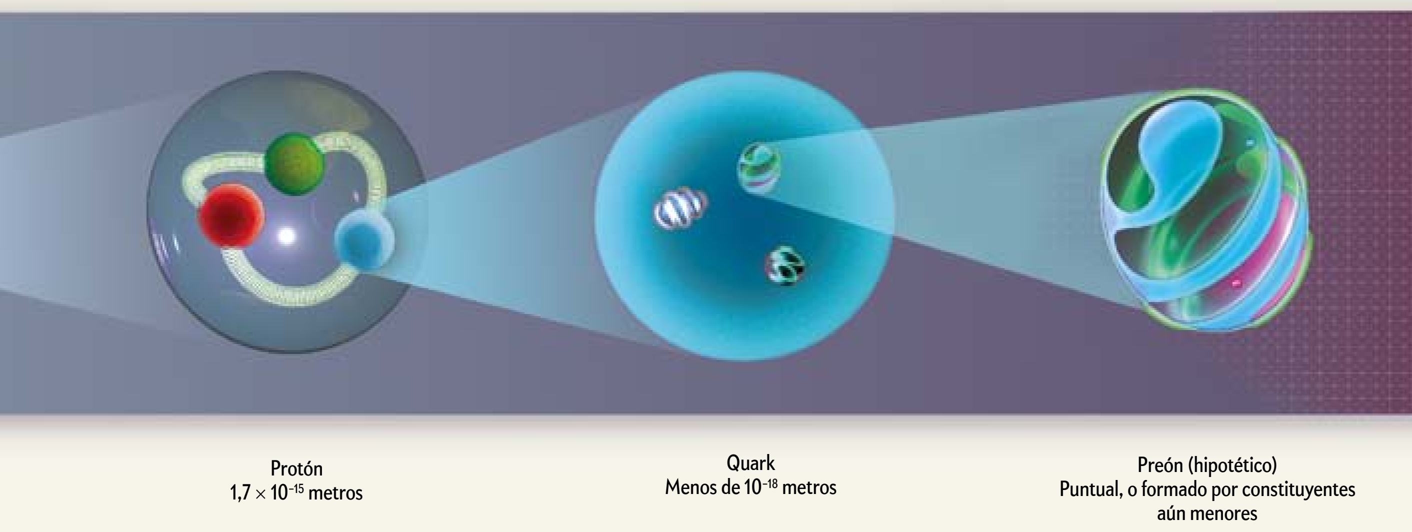
La física es una ciencia experimental. Con independencia de cuán refinada o bella pueda ser una teoría, debe concordar con los datos empíricos. Así pues, ¿qué experimentos permitirían corroborar o refutar la existencia de los preones? El modelo estándar explica con éxito los quarks, los leptones y los bosones del universo sin necesidad de preones; por ello, un buen lugar por el que comenzar sería buscando pequeñas desviaciones experimentales con respecto a las predicciones del modelo estándar. En este contexto, existen dos posibilidades de investigación que se muestran particularmente atractivas.

La primera concierne al tamaño de las partículas. En el modelo estándar, quarks y leptones son puntuales; es decir, poseen un tamaño nulo y carecen de estructura interna. Si midiésemos su tamaño y este resultase distinto de cero, contaríamos con un indicio muy poderoso a favor de la existencia de los preones. Los experimentos han mostrado que protones y neutrones poseen un radio característico de unos 10^{-15} metros. Los mayores aceleradores de partículas del mundo han intentado determinar las dimensiones de quarks y leptones, pero hasta el momento todos los datos apoyan la hipótesis de que poseen un tamaño nulo o, a lo sumo, entre 0,0002 y 0,001 veces el del protón. A fin de distinguir entre ambas posibilidades (un tamaño nulo o uno ínfimo), debemos efectuar mediciones mucho más precisas. En este sentido, la ingente cantidad de datos de colisiones que esperamos obtener en el LHC, tanto a la energía a la que ha venido operando hasta ahora como cuando funcione a la máxima potencia para la que fue diseñado, supone una posibilidad esperanzadora.

Otra manera de investigar la posible subestructura de las partículas conocidas, al menos en lo que respecta al caso de los leptones, consiste en estudiar su espín y su momento magnético. Si nos permitimos cierta licencia literaria, podemos imaginar el electrón como una bola que rota en torno a su eje. La magnitud de esa rotación queda determinada por un número cuántico denominado espín. Al igual que el resto de los fermiones, el espín del electrón asciende a 1/2. La combinación de espín y carga eléctrica confiere al electrón un momento magnético, que no es sino una forma elaborada de decir que la partícula se convierte en un pequeño imán, con un polo norte y un polo sur. La hipótesis de que los leptones son objetos puntuales de espín 1/2 implica que deben poseer un momento magnético determinado. Si las mediciones registrasen una desviación con respecto a dicho valor, ello supondría un fuerte indicio de que no se trata de partículas verdaderamente puntuales y que, por tanto, podrían hallarse compuestas de preones.

Hace ya tiempo que se sabe que el momento magnético del electrón y el del muon difieren ligeramente del que esperaríamos

MALCOLM GODWIN



de una partícula puntual. Pero esa pequeña diferencia no guarda relación alguna con los preones, sino que puede explicarse dentro del modelo estándar. Cada leptón se encuentra rodeado por una nube de partículas virtuales que aparecen y desaparecen sin cesar. Esa nube adquiere cierto volumen, lo cual se traduce en un momento magnético que difiere en un uno por mil del que poseería una partícula puntual. El efecto de los preones resultaría aún menor, pero detectable. El laboratorio Fermilab, cerca de Chicago, ha diseñado una serie de experimentos para determinar el momento magnético del muon con una precisión cuatro veces mayor que la actual.

Otra línea experimental consiste en analizar los datos obtenidos en los aceleradores, con el objetivo de hallar desintegraciones compatibles con el modelo de preones y con la suposición de que los miembros de la segunda y la tercera generación correspondiesen a estados excitados de las partículas de la primera. Uno de tales procesos corresponde a la desintegración de un muon en un electrón y un fotón, la cual no ha sido observada aún. En caso de producirse, los datos acotan su frecuencia a menos de una vez cada 100.000 millones.

Todos los datos experimentales acumulados hasta la fecha respaldan la hipótesis de que quarks y leptones constituyen partículas puntuales de espín 1/2. Para aquellos de nosotros que creemos que la existencia de una segunda y tercera generación de partículas proporciona un tentador indicio de una nueva física, las últimas décadas han resultado frustrantes. Ahora, sin embargo, se nos presenta una clara oportunidad de explorar ese territorio desconocido. Durante 2011, el LHC hizo colisionar haces de protones con una energía total de 7 teraelectronvoltios (TeV), 3,5 veces más que el récord anterior, que llevaba 25 años en manos del acelerador Tevatrón, en el Fermilab. En un año, el LHC ha generado tantos datos como el Tevatrón durante toda su vida útil. En 2012, el CERN incrementó la energía de las colisiones del LHC hasta alcanzar los 8 TeV, con la previsión de cuadriplicar el número de datos antes de realizar una parada técnica de año y medio. El LHC volverá a estar operativo a finales de 2014 o principios de 2015, cuando comenzará con colisiones a 13 y 14 TeV.

El modesto aumento en la energía de las colisiones que ha tenido lugar en 2012 tal vez parezca insignificante, pero reviste gran importancia para la búsqueda de preones, pues implica quintuplicar el número de colisiones de alta energía, aquellas que exploran las distancias más diminutas. Los incrementos previstos para 2014 y 2015 supondrán una mejora impresionante del potencial del LHC.

Además del LHC, uno de los nuevos programas de investigación que se llevarán a cabo en el Fermilab permitirá investigar la existencia de los preones. Desde el desmantelamiento del Tevatrón, los aceleradores del Fermilab ya no compiten por alcanzar las mayores energías, sino por la capacidad de explorar fenómenos muy exóticos con una precisión sin precedentes. Dos de los experimentos más relevantes para la búsqueda de preones medirán el momento magnético del muon y buscarán desintegraciones de muones en electrones y fotones.

La búsqueda en pos de una estructura interna de quarks y leptones goza hoy de un futuro más brillante del que ha conocido en mucho tiempo. Mientras usted lee este artículo, numerosos físicos nos encontramos analizado la inmensa cantidad de datos generados en el LHC, buscando pruebas de un tamaño distinto de cero para quarks y leptones, o pistas sobre la existencia de generaciones adicionales de los bosones transmisores de las interacciones («hermanos pesados» de los bosones *W* y *Z*). Sin duda, los próximos años marcarán el principio de una nueva incursión en el reino de lo subatómico.

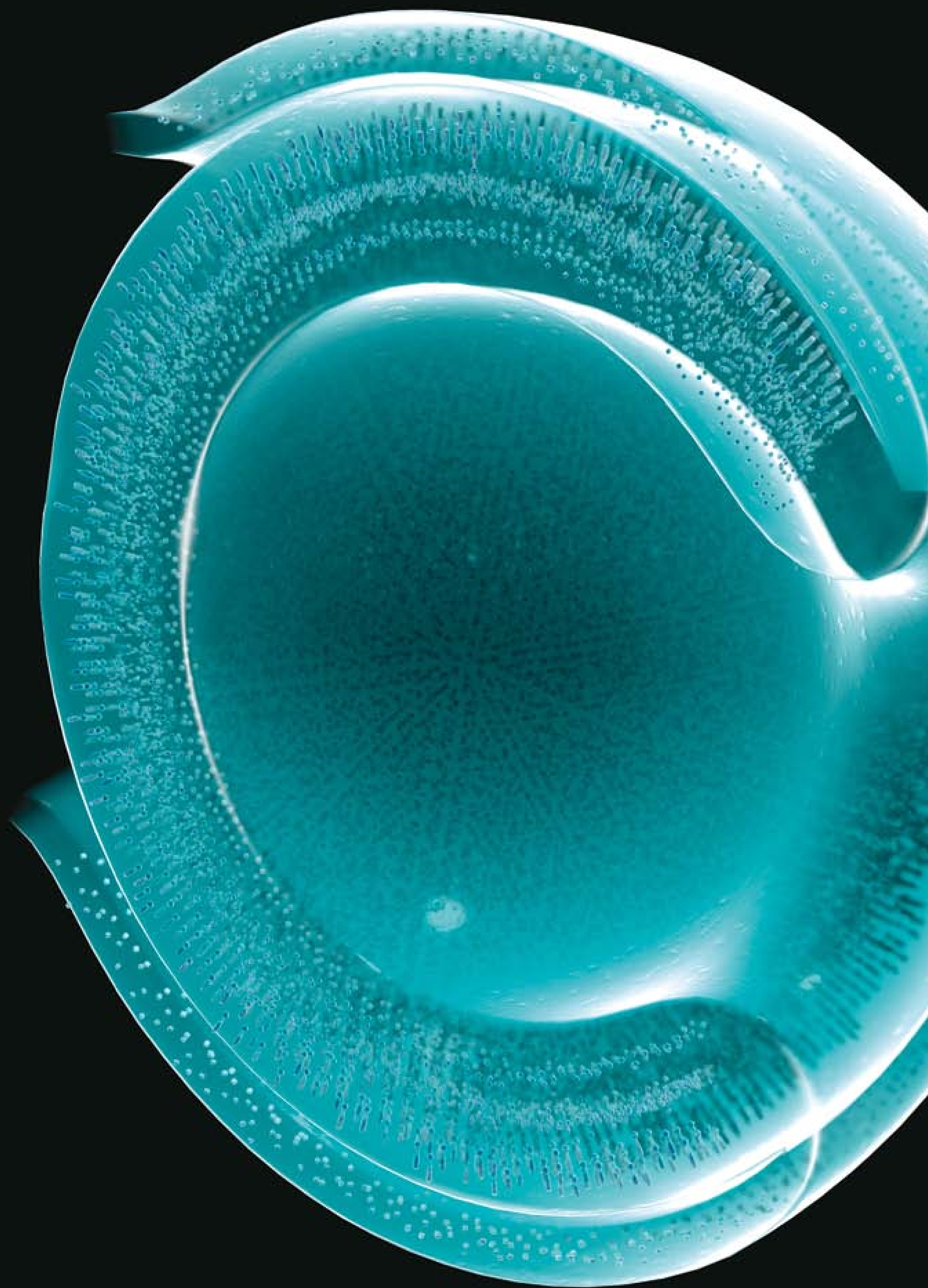
PARA SABER MÁS

A composite model of leptons and quarks. Michael A. Shupe en *Physics Letters B*, vol. 86, n.º 1, págs. 87-92, 10 de septiembre de 1979.

A schematic model of quarks and leptons. Haim Harari en *Physics Letters B*, vol. 86, n.º 1, págs. 83-86, 10 de septiembre de 1979.

Preons: Models of leptons, quarks and gauge bosons as composite objects. Ian A. D'Souza y Calvin S. Kalman. World Scientific Publishing, 1992.

The quantum frontier: The large hadron collider. Don Lincoln. Johns Hopkins University Press, 2009.



MEDICINA

Cultivo ocular

Se ha conseguido que un grupo de células formen una retina, un avance decisivo en la creación extracorporal de órganos para trasplantes

Yoshiki Sasai

Ilustraciones de Bryan Christie

EN SÍNTESIS

Las células madre dan origen a todos los órganos del cuerpo, un proceso que fascina y desconcierta, por igual, a la comunidad científica.

Un grupo japonés, pionero en el campo, ha demostrado que es posible desarrollar retinas, de humano y de múrido, en una placa de laboratorio.

Ese hito permite comprender mejor el desarrollo del cerebro y puede llegar a aportar tratamientos para las patologías oculares.



Yoshiki Sasai es director del grupo de organogénesis y neurogénesis del Centro RIKEN de Biología del Desarrollo en Kobe, Japón. Se licenció en medicina y se doctoró en neurobiología molecular en la facultad de medicina de la Universidad de Kyoto.



EN EL SENO MATERNO, UNA PELOTA DE CÉLULAS IDÉNTICAS SE DESARROLLA EN una amplia diversidad de tipos celulares que terminan formando estructuras muy ordenadas, que originarán el conjunto de órganos del cuerpo humano. El proceso cumple un guión biológico interno que dirige cada pliegue y arruga del tejido para que adquiera de manera exacta las formas y dimensiones adecuadas.

Los investigadores que están familiarizados con esa transformación de elementos sencillos en un sistema complejo no dejan de maravillarse ante el desarrollo embrionario. Siempre soñaron con replicar las fases tempranas del mismo en el banco de laboratorio, con un doble fin: desentrañar el proceso biológico y convertir ese conocimiento en métodos para reparar y reemplazar tejidos dañados. Su momento puede haber llegado. Gracias a los recientes descubrimientos sobre los mecanismos del desarrollo podríamos portar a la mesa del quirófano, de aquí a diez años y para su trasplante, órganos desarrollados fuera del cuerpo [*véase* «Retos de la medicina regenerativa», por M. J. Barrero y J. C. Izpisúa Belmonte; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2012].

Mi optimismo ante semejante posibilidad se apoya en la investigación reciente realizada en mi laboratorio sobre células madre, que se diversifican en otros tipos celulares. Hemos demostrado que las células madre, incluso cuando crecen en cultivo, se muestran capacitadas para dar lugar a una retina, estructura fundamental del ojo que traduce la luz procedente del mundo exterior en señales eléctricas y químicas que se transmiten al resto del cerebro. En otro trabajo, acometido con mis colaboradores, cultivamos tejido cortical y parte de la glándula pituitaria. En esos experimentos, hemos aprovechado el conocimiento cada vez mayor acerca de los sistemas de señalización innatos del propio cuerpo para «convencer» a una capa plana de células inconexas de que formasen una estructura perfilada y tridimensional. Sirviéndose de las señales químicas que les proporcionamos, las células madre asumieron la construcción de su propia retina. Este resultado alimenta la esperanza de que un tejido retiniano producido de ese modo pueda ayudar en terapia de trastornos oculares, como la degeneración macular.

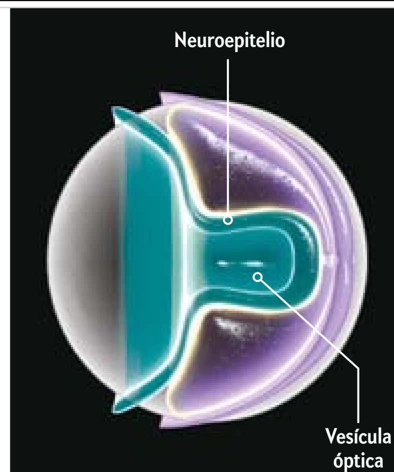
FLOTANTES

Cuando iniciamos los primeros ensayos de cultivo de una retina, buscábamos respuestas a las cuestiones básicas sobre la formación de la misma. Sabíamos que la retina emergía del diencéfalo, porción del cerebro embrionario. Durante etapas tempranas del desarrollo embrionario, un segmento del diencéfalo se extiende y da lugar a la vesícula óptica, una estructura parecida a un globo. Posteriormente, la vesícula se pliega hacia dentro y adquiere la forma del cáliz óptico, tejido que continúa transformándose para dar lugar a la retina.

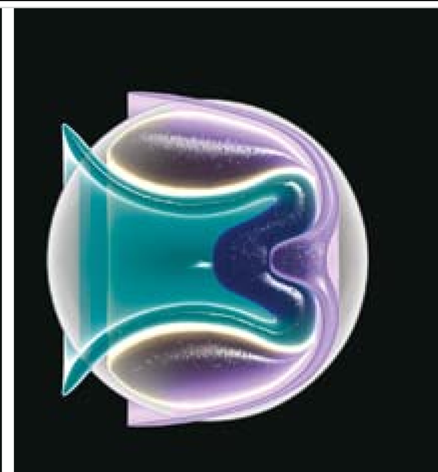
BASE

Configuración de la niña de mis ojos

El desarrollo de un ojo a partir de un pedacito de tejido embrionario comienza cuando una capa interna, el neuroepitelio, se pliega hacia fuera, y se convierte en la vesícula óptica (día 9). La capa externa de la yema empieza a plegarse hacia dentro (día 9,5); así se produce el desarrollo de la vesícula del cristalino (día 10). Parte de la vesícula óptica se pliega para formar el cáliz óptico, que en concierto con la vesícula del cristalino se convierte en la retina y el nervio óptico y, en el exterior, en el cristalino (día 10,5). La retina contiene tres capas celulares (*inserto*): bastones y conos; células horizontales, bipolares y amacrinas; y células ganglionares.



Día 9 (ratón)



Día 9,5

Desde hacía más de un siglo se venía debatiendo el mecanismo preciso subyacente bajo la génesis del cáliz óptico, una controversia que todavía persiste entre quienes estudian el desarrollo del cerebro. En el centro del debate, el papel que desempeñan las estructuras vecinas, a saber, el cristalino y la córnea. Para algunos autores, el cristalino empuja físicamente a la retina obligándola a plegarse hacia el interior; otros sugieren que el cáliz óptico podría formarse sin la ayuda de ninguno de los tejidos cercanos del cristalino.

Es muy difícil observar lo que sucede en animales vivos, en desarrollo. Para obviar este inconveniente, hace unos diez años mi grupo decidió experimentar otra vía: aislar el desarrollo del ojo, básicamente mediante el cultivo y observación de células madre embrionarias expuestas a sustancias químicas implicadas en la formación del ojo. Las células madre embrionarias son el tipo más inmaduro de células madre que, andando el tiempo, se diferencian en los distintos tejidos del cuerpo, desde las neuronas hasta las células musculares.

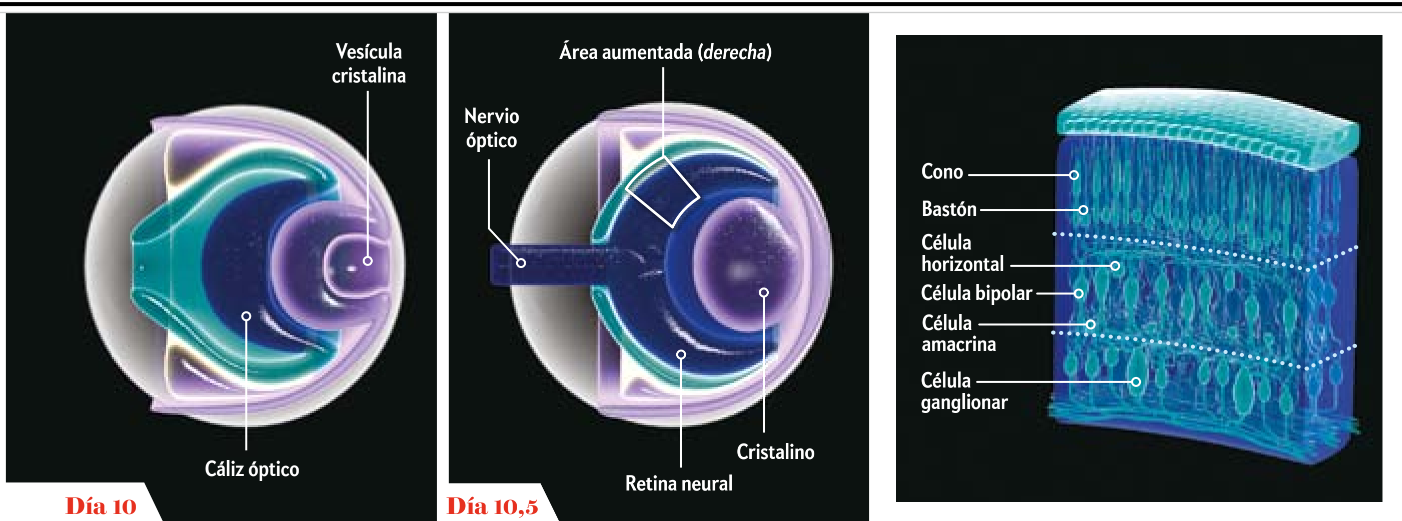
No existían técnicas para generar órganos a partir de cultivos de células madre. En algunos intentos se sembraban células individuales en andamiajes artificiales con forma de vejiga o esófago. Los ingenieros de tejidos habían obtenido un éxito precario en la creación de órganos reales con esa técnica. Por esta razón, decidimos intentar un enfoque diferente. A modo de preludio en el empeño, ideamos en el año 2000 un método de cultivo celular para transformar células madre embrionarias de ratón en varios tipos de neuronas. Pusimos una sola capa de células madre embrionarias de ratón en una placa de cultivo, junto con células «cebadoras», las cuales transmiten señales químicas que promueven la maduración de las células madre más allá de su estado embrionario. Aunque sabíamos que la lámina plana en cuestión no replicaba el contorno tridimensional de los órganos humanos reales, queríamos averiguar si la propia señalización química de las células bastaba para inducirlas a generar los tipos neuronales especiales que caracterizan el desarrollo temprano del ojo.

Al principio no tuvimos mucho éxito. Pero en 2005 conseguimos un hito importante, cuando inventamos un método que permitía a las células madre flotar en una solución de cultivo y superar, con ello, las restricciones bidimensionales que nos imponían las técnicas hasta entonces empleadas en nuestro laboratorio. Comenzamos a usar este cultivo tridimensional, denominado cultivo flotante, por una serie de razones. Primero, una agregación tridimensional de células puede generar la topología compleja de un tejido mejor que otra formada por una lámina plana. Segundo, una célula necesita comunicarse con otra para desarrollar una estructura compleja; un cultivo tridimensional es más apropiado para propiciar esas comunicaciones, dado que las células tienen más flexibilidad para interaccionar entre sí.

Aplicando el nuevo método, suspendimos células dispersas sobre una minúscula cantidad de medio líquido en pocillos de una placa de laboratorio. Observamos que comenzaban a unirse con sus compañeras de pocillo. Se logró que los pequeños agregados celulares así constituidos, de unas 3000 células por pocillo, se diferenciaran en el mismo tipo de progenitores neurales (células neurales inmaduras) que pueblan la parte frontal del cerebro. Las células empezaron a enviarse señales unas a otras; al cabo de tres o cuatro días, se organizaron espontáneamente en una esfera hueca de una monocapa de células, un neuroepitelio. A este método para producir láminas lo denominamos cultivo flotante, libre de suero, de agregados embrionarios similares a los naturales con reagregación rápida, o abreviadamente cultivo SFEBq (de s*erum-*f*ree floating culture of* e*mbryoid* b*ody-like aggregate with* q*uick reaggregation*).

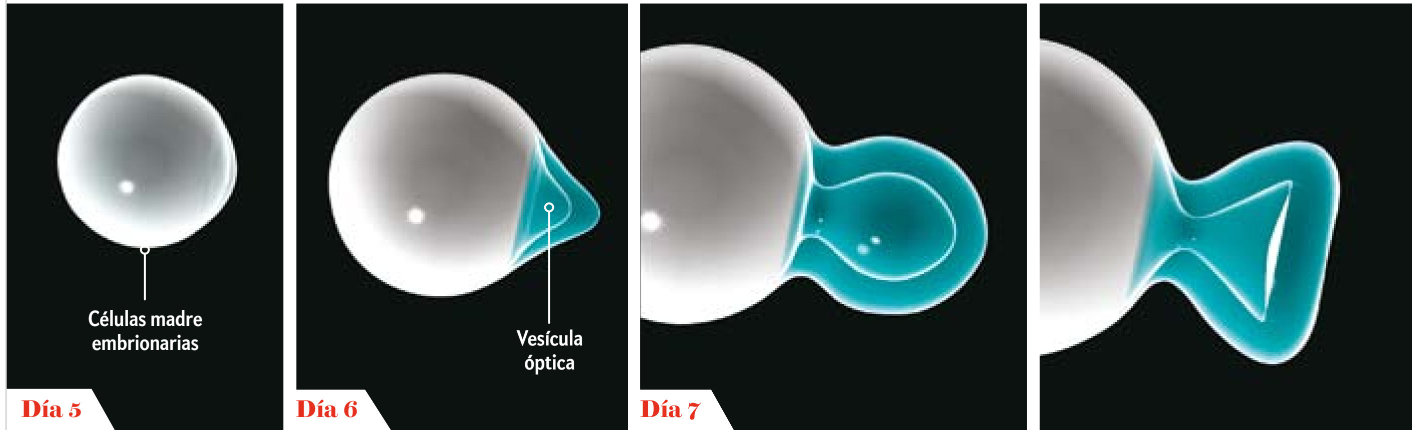
En el embrión, las células neuroepiteliales terminan formando estructuras cerebrales específicas tras recibir señales químicas que provienen del exterior celular. Una de esas señales insta el desarrollo del diencéfalo, que más tarde da lugar a la retina y al hipotálamo (región del cerebro que controla el apetito y otras funciones fisiológicas básicas). Tras conseguir que las células formaran esferas in vitro, intentamos inducir la diferenciación de estas células en progenitores de la retina (precursores de células retinianas maduras) mediante la adición de un conjunto de proteínas (con las sustancias químicas que desarrollan la misma tarea en el embrión) al cultivo SFEBq.

Después de que estas esferas pasaran varios días más en el cultivo flotante, el tejido retiniano epitelial se proyectaba hacia fuera, produciendo una evaginación, para formar estructuras similares a la vesícula óptica. Además, tales vesículas cambiaban espontáneamente de morfología: la parte epitelial del exterior del cuerpo principal de la esfera se plegaba hacia dentro. Ese movimiento generaba una forma de vaso de brandy que recordaba al cáliz óptico del ojo embrionario. Igual que se observaba en los animales, el cáliz óptico proveniente de células madre em-



Desarrollo en una placa de cultivo

El desarrollo de una retina en una placa de cultivo a partir de células madre embrionarias reproduce el desarrollo del ojo en el seno materno. La técnica tiene un valor incalculable en la investigación básica, sin olvidar que pudiera también llevarnos hasta nuevos tratamientos para las personas cuya visión se deteriora. Como muestra la ilustración inferior, las células madre embrionarias se agregan y empiezan a formar la temprana vesícula óptica unos 5 días después de haber sido



brionarias constaba de dos paredes: la pared (o cara) epitelial, externa, y la pared interna de la retina real.

Dicho de otro modo, la agregación, en la placa de cultivo, de células madre dispersas basta para formar una estructura ordenada, resultado que deja literalmente los ojos como platos. A diferencia de lo que ocurre en el embrión, cerca del cáliz óptico no se forman ni el cristalino ni la córnea. Tal descubrimiento ofrecía una respuesta nítida a la vieja cuestión sobre si esta protorretina precisaba o no fuerzas externas provenientes de tejidos adyacentes, como las células del cristalino. La formación de la retina, al menos in vitro, corresponde a un fenómeno de autoorganización basado en un programa interno que reside en esas células.

LA RETINA, CAPA A CAPA

El desarrollo normal proseguía en la placa de cultivo, lo mismo que el observado en el embrión animal. Cuando el cáliz óptico se sometió a otras dos semanas más en el cultivo flotante, el tejido creció hasta alcanzar un par de milímetros de diámetro, al tiempo que el epitelio retiniano de una sola capa se transformaba, como en el embrión, en una estructura estratificada que contenía las seis categorías celulares presentes en la retina posnatal. El material laminar contenía una capa externa de fotorreceptores y otra, más profunda, de células ganglionares, que, en condiciones normales (en el organismo), conectan la retina con el cerebro. Entre una y otra capa, igual que acontece en una retina real, había varias capas de conexión formadas por interneuronas. Como ocurría antes, la formación de varias capas tenía lugar a través de un programa interno que coordinaba el tipo de células que debían producirse y su organización en un espacio tridimensional.

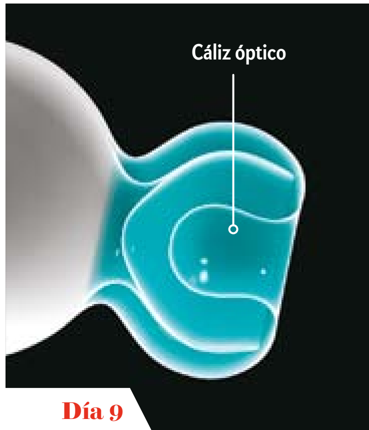
Nuestro trabajo no ha terminado. Todavía desconocemos el mecanismo de formación del cáliz óptico o el modo en que un globo de células genera una estructura compleja y estereotipada. La emergencia espontánea de formas intrincadas a partir de una masa homogénea de materia se conoce por ruptura de simetría y ocurre a lo largo de todo el desarrollo embrionario. Si no fuera por la ruptura de simetría, las divisiones consecutivas del cigoto no llegarían a dar más que una masa indiferenciada de células. Nuestro cultivo autoorganizado de células madre embrionarias podría ser una plataforma experimental ideal para desentrañar los esquivos mecanismos de ese proceso durante la embriogénesis de los mamíferos.

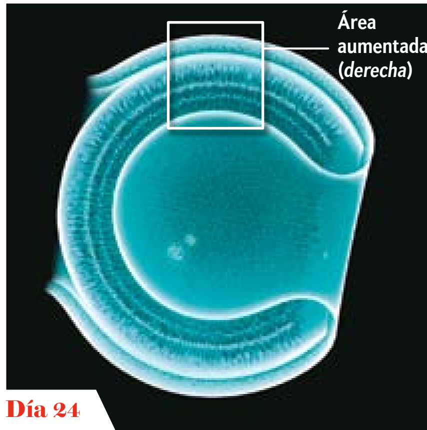
Otra cuestión importante tiene que ver con el modo en que el epitelio retiniano, que inicialmente no es más que una lámina de células, programa la conformación del cáliz óptico. En general, la fuerza y rigidez mecánicas controlan los cambios operados en el tejido epitelial. Midiendo la dirección de la fuerza y de la rigidez del tejido en diferentes partes del epitelio durante la formación del cáliz óptico in vitro, descubrimos tres pasos que conducen a la creación de la estructura. A medida que se va formando el cáliz óptico, disminuye la rigidez de la retina y aumenta la flexibilidad. Al mismo tiempo, las células que se encuentran entre la retina y el epitelio toman forma de cuña; por último, la retina comienza a plegarse hacia dentro debido a su rápida expansión. Estos tres pasos resultan fundamentales en la formación del cáliz óptico. De hecho, cuando estas condiciones relativas a la mecánica tisular se simulan en un ordenador, aparece la familiar forma de vaso de brandy.

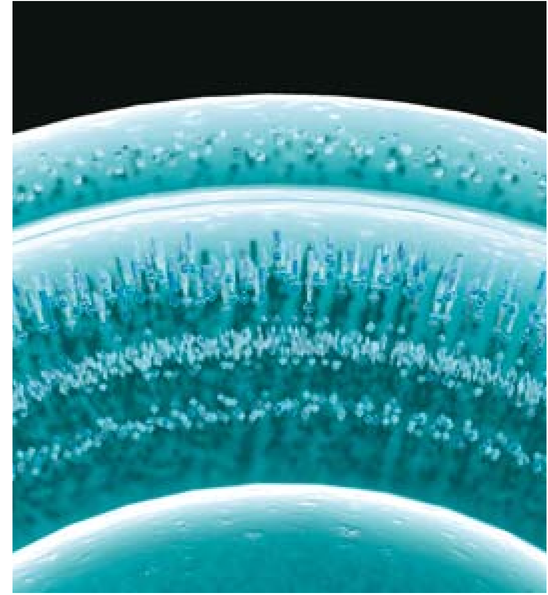
PARA VER CON CLARIDAD

Obviamente, la gente que ha oído hablar de nuestra investigación quiere saber si el estudio de las células madre embrionarias de ratón llegará a ayudar a personas con enfermedades oculares. Hemos hecho avances en esa dirección. En particular, mi laboratorio ha logrado la formación del cáliz óptico y del tejido neural con múltiples capas a partir de células madre embrionarias humanas. Se espera poder aplicar el mismo método de cultivo en células madre pluripotentes inducidas, células adultas que tras un proceso de desarrollo inverso se comportan como células madre embrionarias. También hemos inventado y refinado un método de crioconservación en nitrógeno líquido que permite almacenar de un modo fiable el tejido retiniano derivado de células embrionarias humanas.

mezcladas con factores de crecimiento. La vesícula se hincha alrededor del día 7; días más tarde, la estructura se desploma para formar el cáliz óptico, que alrededor del día 24 ya tiene definidas todas las capas de la retina.







Todo este trabajo nos proyecta a la obtención de aplicaciones médicas en el tejido retiniano. Por ejemplo, podríamos crear retinas artificiales que permitieran investigar la patología de enfermedades comunes del ojo, para llegar, tal vez, a desarrollar medicamentos y terapias génicas que reviertan la degeneración de la retina.

Tres categorías de degeneración de la retina que podrían beneficiarse de nuestra investigación (degeneración macular, retinosis pigmentaria y glaucoma) afectan a millones de personas en todo el mundo. Cada enfermedad causa problemas en diferentes capas de la retina. En la degeneración macular, la integridad del epitelio se daña por descomposición del tejido de soporte, descomposición que conduce al deterioro de los fotorreceptores; en especial, en la región central de la retina. En la retinosis pigmentaria, el número de bastones (unos fotorreceptores) disminuye gradualmente a lo largo de los años. El primer síntoma en aparecer es la ceguera nocturna. Más tarde, el paciente pierde la mayor parte del campo visual, salvo una pequeña región central. Por último, el glaucoma daña las células ganglionares, que conectan la retina con el centro de procesamiento visual de la corteza de la parte posterior del cerebro a través de nervios ópticos.

La degeneración macular parece, entre las tres, la más indicada para ser curada mediante terapia de sustitución celular. Las células madre embrionarias humanas y las pluripotentes inducidas pueden generar con relativa facilidad el tejido de soporte, o epitelio pigmentario retiniano, tanto en cultivos convencionales como a través de nuestro método; las células pueden extraerse directamente de tales cultivos. En Estados Unidos se han acometido ya ensayos preliminares y a pequeña escala con estas células. Otros países se plantean realizar ensayos similares. En dichos trabajos, para reemplazar al menos parte del tejido dañado, se inyectan, por medio de una aguja fina, células pigmentarias epiteliales derivadas de células madre en el espacio que hay entre el epitelio pigmentario y las capas de fotorreceptores.

La terapia celular para la retinosis pigmentaria requiere más avances técnicos, antes de poder ser aplicada en humanos. A diferencia de los cultivos habituales, nuestra técnica permite generar fotorreceptores de tipo bastón en una capa densa de células que sería apropiada para el trasplante, pero hace falta una herramienta fundamental antes de que los trasplantes puedan mejorar la visión. Al contrario que el sencillo tejido de soporte del epitelio, los fotorreceptores necesitan integrarse en el circuito neural del ojo; en especial, deben reconectarse a otro tipo de célula sensorial, una célula bipolar; no sabemos todavía cómo realizar de una manera eficiente ese enlace. Si se consiguiera el trasplante de fotorreceptores, sería posible que incluso en los casos avanzados de retinosis pigmentaria se recuperara, al menos, parte de la visión.

El glaucoma puede resultar la patología más renuente a la terapia celular. Los cultivos de células madre embrionarias pueden generar las células ganglionares requeridas en esa empresa. En el ojo posnatal, sin embargo, queda inhibido el crecimiento del nervio óptico, y nadie ha imaginado aún cómo inducir la reconexión de sus axones (las ramas que mandan señales al cerebro y que forman el nervio óptico) con otras células.

Hemos aprendido que los tejidos derivados de células madre embrionarias pueden hacer mucho más de lo que podemos conseguir con la ingeniería de tejidos artificiales en la que se colocan células en andamiajes con forma de capa de piel o de vejiga. Como científicos, debemos descubrir con humildad y paciencia lo que las células en desarrollo nos enseñan sobre los intrincados procesos que hacen que una sola célula se convierta en un órgano de la complejidad del ojo.

PARA SABER MÁS

Self-organizing optic-cup morphogenesis in three-dimensional culture. Mototsugu Eiraku et al. en *Nature*, vol. 472, págs. 51-56; 7 de abril, 2011.

Embryonic stem cell trials for macular degeneration: A preliminary report. Steven D. Schwartz et al. en *Lancet*, vol. 379, n.º 9817, págs. 713-720; 25 de febrero, 2012.

Self-formation of optic cups and storable stratified neural retina from human ESCs. Tokushige Nakano et al. en *Cell Stem Cell*, vol. 10, n.º 6, págs. 771-785; 14 de junio, 2012.

John Carey es escritor. Ha trabajado como corresponsal de ciencia, tecnología, medicina y medioambiente para el semanario *Bloomberg BusinessWeek*.



CAMBIO CLIMÁTICO

CALENTAMIENTO GLOBAL: ¿Más rápido de lo previsto?

La pérdida de hielo, la fusión del permafrost y otros mecanismos de retroalimentación amenazan con acelerar el aumento de las temperaturas

John Carey

Durante la última década, los científicos creyeron haber encontrado la manera de proteger a la humanidad de los mayores peligros del cambio climático. Según aquellos cálculos, si el calentamiento global se mantenía por debajo de los dos grados Celsius, podrían evitarse desastres como una elevación catastrófica del nivel del mar o sequías devastadoras. Restringir el calentamiento a menos de dos grados centígrados implicaría limitar la concentración atmosférica de dióxido de carbono a 450 partes por millón (ppm), un valor superior a las actuales 395 ppm y las 280 ppm de la época preindustrial.

EN SÍNTESIS

Hasta ahora se pensaba que si el calentamiento global se mantenía por debajo de los dos grados Celsius podrían evitarse efectos devastadores, como una elevación catastrófica del nivel del mar.

Investigaciones recientes, sin embargo, indican que tres mecanismos de retroalimentación podrían abocar al planeta a un cambio climático abrupto incluso antes de llegar al límite de los dos grados.

Dichos mecanismos corresponden a la pérdida global de hielo, los cambios que ello induce en las corrientes de circulación oceánica y las emisiones de metano y CO_2 provocadas por el deshielo del permafrost.

Todo lo anterior podría acelerar el calentamiento, desestabilizar el tiempo meteorológico, causar incendios masivos y desencadenar otros desastres ecológicos, como plagas de insectos.

DAN SAELINGER



Al parecer, su análisis pecó de optimista. Los últimos datos globales indican que el planeta está experimentando un cambio más rápido de lo previsto. El volumen de banquisa (hielo marino flotante) que está desapareciendo del océano Ártico supera las previsiones, y el permafrost de Alaska y Siberia libera más metano —gas que ejerce un potente efecto invernadero— de lo que auguraban los modelos. Las plataformas de hielo de la Antártida occidental se desploman más deprisa de lo que se estimaba y los glaciares costeros se deslizan hacia el mar a mayor velocidad. Los fenómenos meteorológicos extremos, como las inundaciones y la ola de calor que azotaron gran parte de EE.UU. en verano de 2012, también aumentan. ¿Qué conclusión cabe extraer de todo ello? «Como científicos, no podemos asegurar que mientras permanezcamos por debajo de los dos grados todo irá bien», explica Stefan Rahmstorf, profesor de física oceánica en la Universidad de Potsdam.

Las causas que podrían estar abocando la Tierra hacia un cambio climático acelerado residen en ciertos mecanismos de retroalimentación: aquellos fenómenos provocados por el calentamiento cuyos efectos contribuyen a un aumento aún mayor de las temperaturas. Aunque la existencia de tales procesos se postuló hace tiempo, tal vez sea ahora cuando hayan comenzado a manifestarse. Una menor extensión de banquisa, por ejemplo, implica que el sol calienta un mayor volumen de agua oceánica, lo cual acelera el deshielo. La fusión del permafrost libera a su vez más CO_2 y metano, etcétera.

El potencial de tales mecanismos de retroalimentación ha convertido a algunos expertos en profetas del desastre. Según ellos, aunque se tomaran de inmediato cartas en el asunto y las emisiones de gases de efecto invernadero se mantuviesen por debajo de 450 ppm —algo que cada vez parece más improbable—, dicha medida podría llegar demasiado tarde. Según James E. Hansen, director del Instituto Goddard de Estudios Espaciales de la NASA, si los niveles de CO_2 no se reducen hasta las 350 ppm, «habremos iniciado un proceso que queda fuera del control de la humanidad». Hansen cree que en este siglo el nivel del mar podría llegar a elevarse hasta cinco metros, lo que anegaría ciudades costeras como Miami y Bangkok. Un aumento de las temperaturas y de los episodios de sequía podría provocar hambrunas masivas. «Las consecuencias resultan casi inconcebibles», sostiene. Podríamos hallarnos al borde de un cambio climático rápido e irreversible hacia un mundo mucho más cálido.

¿Alarmista? Algunos expertos así lo piensan. Ed Dlugokencky, investigador de la Administración Nacional de la Atmósfera y el Océano estadounidense (NOAA) que ha analizado los niveles de metano, opina de otra manera: «No creo que un cambio climático catastrófico suponga una posibilidad a corto plazo». El glaciólogo W. Tad Pfeffer, de la Universidad de Colorado en Boulder, ha estudiado la pérdida de hielo a escala planetaria. Concluye que la elevación del nivel del mar que cabe esperar durante este siglo asciende como mucho a dos metros, no cinco. Sin embargo, no por ello deja de compartir el sentimiento de urgencia que asalta a Hansen, pues incluso los cambios más insignificantes podrían suponer una amenaza para una civilización que solo ha conocido un clima estable: «El público y los responsables políticos deben entender la gravedad que implica un aumento del nivel del mar de 60 o 70 centímetros. Un desastre que avanza con tanto sigilo podría llegar a exterminarnos», advierte.

A pesar del desacuerdo existente entre los expertos sobre la velocidad del cambio climático, la idea de que ciertos mecanismos de retroalimentación podrían estar acentuándolo provoca un profundo desasosiego. Según Eelco Rohling, profesor de cambio climático y oceánico en la Universidad de Southampton, «Debemos comenzar a pensar más sobre las incógnitas conocidas y también sobre las desconocidas. Aunque aún ignoremos una parte de los mecanismos de retroalimentación posibles, los cambios climáticos pasados demuestran su existencia». Martin Manning, científico atmosférico de la Universidad Victoria de Wellington y uno de los principales responsables de los informes que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) elaboró en 2007, teme que para cuando los investigadores identifiquen tales incógnitas podría ser ya demasiado tarde: «La velocidad de cambio durante este siglo será tal que la ciencia no llegará a tiempo», vaticina.

PASADO CÁLIDO, FUTURO CÁLIDO

Gran parte del temor a un cambio climático rápido procede de un conocimiento más preciso de nuestro pasado remoto. Durante los años ochenta del siglo xx, los expertos quedaron atónitos al descubrir en los testigos de hielo que, a lo largo de su historia, el planeta había experimentado en múltiples ocasiones saltos bruscos de temperatura. Desde entonces, se ha reconstruido con detalle la historia de los últimos 800.000 años. En un trabajo fechado hace poco, Hansen halló una correlación muy estrecha entre la temperatura, la concentración de CO_2 y el nivel del mar: los tres parámetros aumentan y disminuyen casi a la par. Tales correlaciones no implican que los gases de efecto invernadero provocasen el calentamiento; sin embargo, un estudio reciente de Jeremy Shakun, de la Universidad Harvard, y sus colaboradores sí apunta en esa dirección. En él se demuestra que, a finales de la última glaciación, el incremento en la concentración de CO_2 precedió al aumento de la temperatura. En un artículo publicado hace poco en *Nature* concluyen que «el calentamiento provocado por el aumento en la concentración de CO_2 explica en gran parte esas variaciones de temperatura».

En el pasado, algunos cambios climáticos han sucedido con una rapidez enorme. El análisis de los sedimentos del mar Rojo realizado por Rohling evidencia que, durante el último período cálido interglacial (hace unos 125.000 años), el nivel del mar aumentó y disminuyó hasta dos metros en cien años. «Se trata de una velocidad pasmosa», advierte. Sus estudios indican también que el nivel del mar pudo haberse situado unos seis metros por encima del actual; todo ello en una época en la que el clima era muy similar al nuestro. «No nos dice cómo será el futuro, pero desde luego llama la atención», sostiene Richard Alley, profesor de ciencias geológicas en la Universidad estatal de Pensilvania.

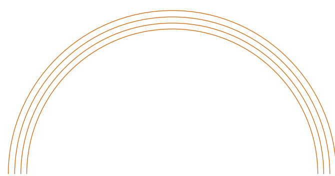
También resulta sorprendente la escasa energía adicional, o forzamiento radiativo, que hizo falta en el pasado para provocar esas fluctuaciones térmicas. Hace 55 millones de años, el Ártico era un paraíso subtropical con una temperatura media de 23 grados centígrados. Es cierto que los cocodrilos medraban en Groenlandia, pero los trópicos probablemente resultasen demasiado cálidos para la mayoría de las especies. Según parece, la chispa que encendió ese período cálido, conocido como Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM), fue un incremento de dos grados en la temperatura del planeta, más elevada que la actual. Probablemente, el calentamiento provocó una rápida liberación de metano y dióxido de carbono y, con ello, un aumento adicional de la temperatura y más emisiones. El resultado fue un invernadero planetario que perduró millones de años [*véase* «El último gran calentamiento global», por Lee

R. Kump; Investigación y Ciencia, septiembre de 2011].

Durante los últimos cien años, la humanidad ha provocado un pequeño calentamiento de 0,8 grados Celsius, pero estamos vertiendo gases de efecto invernadero en la atmósfera a un ritmo diez veces superior al del período previo al PETM. Según Matthew Huber, profesor de ciencias geológicas y atmosféricas en la Universidad Purdue: «Si continuamos quemando carbono durante los próximos cien años, experimentaremos el mismo tipo de cambio».

Nuestra presión sobre el clima es mayor que la de los fenómenos que originaron las glaciaciones. Tal y como observara hace un siglo el astrónomo Milutin Milanković, el ir y venir de las glaciaciones se halla correlacionado con las ligeras variaciones que experimentan la órbita y la inclinación de la Tierra. A lo largo de decenas de miles de años, y como respuesta a la atracción gravitatoria que ejercen otros planetas, la órbita de la Tierra cambia desde una geometría casi circular a otra ligeramente excéntrica. Hansen explica que tales variaciones modifican el flujo de luz solar que llega a nuestro planeta en una media de 0,25 vatios por metro cuadrado, una cantidad relativamente pequeña. Para provocar los cambios climáticos registrados, sus efectos tuvieron que verse amplificados por mecanismos de retroalimentación, como variaciones en la cantidad de hielo marino o emisiones de gases de efecto invernadero. Euan Nisbet, profesor de geología de la Universidad Royal Holloway de Londres, explica que, durante los calentamientos pasados, tales mecanismos de retroalimentación no hicieron sino acumularse y amplificarse mutuamente.

Hoy, el forzamiento derivado de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero resulta mucho mayor que el postulado por la teoría de Milanković: 3 vatios por metro cuadrado, y continúa en aumento. ¿Cambiará el clima a un ritmo 12 veces más rápido? No necesariamente: «No podemos relacionar la respuesta del pasado con la del futuro», explica Rohling. «Lo que aprendemos de ello es qué mecanismos participan, cómo se originan y qué repercusiones negativas pueden implicar.»



El mecanismo de retroalimentación más temido por los expertos es la pérdida de hielo. Ello disminuye la reflectividad de la superficie del planeta y aumenta su capacidad para absorber la radiación solar

RETROALIMENTACIONES PREOCUPANTES

Los expertos creen que el mecanismo de retroalimentación más veloz de todos es el relacionado con las corrientes oceánicas, que transportan calor por todo el globo. Si se vierte una ingente cantidad de agua dulce en los mares septentrionales (debido a una fusión de los glaciares o a un aumento en las precipitaciones, por ejemplo), las corrientes cálidas podrían ralentizarse o cesar, lo cual desestabilizaría el motor de las corrientes oceánicas del planeta. Un cambio de tal envergadura podría convertir el clima de Groenlandia en uno templado en una década. «Los registros de los testigos de hielo de Groenlandia muestran que tales cambios pueden ocurrir en apenas diez años», explica Pieter Tans, científico principal del Laboratorio de Investigación de Sistemas Geológicos de la NOAA.

La retroalimentación causada por una inyección masiva de agua dulce se dilucidó a comienzos del presente siglo. «Muchos de nosotros llegamos a inquietarnos de veras», recuerda Alley. Con todo, el investigador añade que una modelización más detallada del proceso ha demostrado que, si bien la adición de agua dulce al océano resulta preocupante, en estos momentos la velocidad del proceso se muestra muy inferior a aquella que podría provocar cambios drásticos en el clima.

Otro mecanismo de retroalimentación más apremiante tiene que ver con el permafrost. Hasta hace poco, se pensaba que la materia orgánica de la tundra penetraba solo un metro en el suelo congelado. Además, se creía que el calentamiento tardaría mucho tiempo en comenzar a derretir cantidades sustanciales de las capas inferiores del permafrost. Investigaciones recientes, sin embargo, han invalidado ese planteamiento. «Casi todos los datos que hemos registrado han sido inesperados», advierte Ted Schuur, biólogo de la Universidad de Florida.

La primera sorpresa llegó al descubrirse que el carbono alcanza los tres metros de profundidad, lo cual implica que hay enterrado mucho más de lo que se pensaba. Por otro lado, Siberia se encuentra salpicada de colinas gigantes de yedoma, un permafrost rico en materia orgánica, originado por la deposición de sedimentos eólicos procedentes de China y Mongolia. Tales almacenes de carbono albergan cientos de miles de millones de toneladas, del orden del doble de lo que hoy contiene la atmósfera. «Una bomba de relojería», en palabras del buscador de metano Joe von Fischer, de la Universidad estatal de Colorado. Una fusión del permafrost implica que una mayor cantidad de microorganismos puede nutrirse del carbono orgánico y convertirlo en CO_2 y metano, lo cual aumentaría las temperaturas y aceleraría el deshielo.

La velocidad del proceso podría estar aumentando. El hielo derretido forma a menudo lagos someros sobre la superficie del permafrost. Katey Walter Anthony, de la Universidad Fairbanks de Alaska, ha detectado burbujas de metano que ascienden desde el fondo de dichos lagos. Además, numerosos investigadores han observado que el permafrost puede agrietarse en forma de termokarst, pequeños cañones que dejan grandes superficies de terreno expuestas al aire, con lo que facilitan la fusión y la liberación de gases de efecto invernadero. Por último, estudios recientes en la costa siberiana y en la isla noruega de Spitsbergen han detectado plumas ascendentes de metano procedentes del lecho oceánico en regiones de aguas poco profundas.

Si extrapolamos esos escapes de gas a regiones más extensas, las cifras se disparan. Sin embargo, las mediciones globales de la concentración de metano no parecen indicar un aumento reciente. Según Vladimir E. Romanovsky, investigador de la Universidad Fairbanks de Alaska que ha realizado varios análisis sobre la temperatura del permafrost, una razón para ello se debe a que las regiones más problemáticas se encuentren aún muy aisladas. Por otro lado, puede que las mejoras técnicas logradas durante los últimos años hayan conducido al descubrimiento de «nuevos» puntos calientes que, tal vez, siempre estuvieron ahí. Por ello, Dlugokencky no cree que un cambio climático rápido vaya a llegar de la mano de una variación en la concentración de metano.

Otros no se muestran tan seguros. Su preocupación obedece a la existencia de otra gran fuente potencial de metano: las marismas tropicales. Si aumentan las precipitaciones en los trópicos —algo probable si la atmósfera se calienta—, las zonas pantanosas se expandirán, se volverán más productivas y, en consecuencia, se favorecerá una mayor descomposición anaeróbica, productora de metano. Un crecimiento de las regiones pantanosas podría liberar una cantidad de metano adicional equivalente o superior a la generada por el calentamiento ártico. ¿Hasta qué punto deberíamos preocuparnos? «No lo sabemos, pero deberíamos continuar vigilantes», opina Nisbet.

EL EFECTO DEL HIELO

El mecanismo de retroalimentación que más alarma a numerosos climatólogos es la pérdida global de hielo. Un gran número de modelos nunca llegó a predecir la drástica contracción que la banquisa ártica ha experimentado durante los últimos veranos. «Ese ha sido el gran fallo de los modelos», apunta Nisbet. También en Groenlandia y en la Antártida está desapareciendo hielo.

A fin de esclarecer el fenómeno, los expertos han seguido la evolución de los glaciares de Groenlandia por medio de satélites y mediciones topográficas. Asimismo, han enviado sondas submarinas bajo las plataformas de hielo antárticas. «Hemos visto cosas insólitas», comenta Jerry Meehl, científico veterano del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de EE.UU.

En Groenlandia, Sarah Das, glacióloga del Instituto Oceanográfico de Woods Hole, presenció cómo un lago de fusión drenaba de repente sus aguas a través de una fractura (*crevasse*) en una capa de hielo de 900 metros de espesor. El torrente adquirió tal potencia que llegó a despegar el inmenso glaciar del sustrato rocoso y aceleró su deslizamiento hacia el océano. En Alaska, los datos de Pfeffer revelan que el gran glaciar Columbia ha aumentado la velocidad con la que se está deslizando en dirección al mar de un metro diario a entre 15 y 20 metros cada día.

Las grandes plataformas de hielo que flotan junto a las costas de Groenlandia y la Antártida se están desplomando, en una clara señal de inestabilidad. Su base está siendo socavada por un agua oceánica más cálida, al tiempo que un aire más templado agrieta su superficie. Las plataformas de hielo actúan como un contrafuerte que impide que los glaciares continentales adyacentes se deslicen y se introduzcan en el océano. Y aunque la fusión del hielo flotante no eleva el nivel del mar, la sumersión de un glaciar sí lo hace. «En estos momentos intentamos averiguar si el incremento del nivel del mar podría estar produciéndose a un ritmo notablemente mayor de lo que pensábamos», comenta Alley.

Pero el temor al deshielo no procede solo de la elevación del nivel del mar, sino también de su capacidad para disparar un potente mecanismo de retroalimentación: el hielo refleja la radiación solar hacia el espacio; si desaparece, las regiones continentales y oceánicas que queden al descubierto, más oscuras, absorberán una mayor cantidad de energía, lo cual acelerará el proceso. Según Hansen, dicha variación en el albedo (reflectividad) de la superficie terrestre explica que, en el pasado, pequeños forzamientos radiativos acabaran amplificándose. «Y lo mismo ocurrirá ahora», concluye.

Hoy por hoy, son pocos los científicos que van tan lejos como Hansen y que predicen un aumento en el nivel del mar de cinco metros para 2100. «Pero la verdad es que lo ignoramos», reconoce Alley. «Aún creo que las probabilidades están a mi favor [respecto a una elevación moderada], pero no me gustaría que nadie acabase comprando una casa en la costa alentado por mis palabras.»



El calentamiento planetario podría estar acelerándose a causa de los siguientes mecanismos de retroalimentación: el deshielo del permafrost (como en Islandia, *izquierda*), el retroceso de los glaciares (como en glaciar alpino de Trift, que ha reculado tres kilómetros, *centro*) y el hielo fundido que se vierte al océano (como en la isla noruega de Spitsbergen, *derecha*).

UN BOSQUE PARA LOS ÁRBOLES

Las fluctuaciones pasadas del clima terrestre dejan constancia de que, si forzamos demasiado el planeta, los mecanismos de retroalimentación se encargarán de transformarlo por completo. «Si quemamos todo el carbono disponible, podemos afirmar con casi total seguridad que alcanzaremos un nivel de calentamiento similar al del PETM», augura Huber. Buenas noticias para los cocodrilos árticos tal vez, pero no tanto para la humanidad ni para la mayor parte de los ecosistemas.

Con todo, lo que mantiene vigilantes a los expertos es la posibilidad de que, aunque esos mecanismos de retroalimentación no resulten catastróficos a corto plazo, acaben desencadenando otros que sí lo sean. Uno de los principales candidatos lo hallamos en el ciclo hidrológico. Cada año aparecen nuevos indicios de que el cambio climático está causando fenómenos meteorológicos extremos, como inundaciones y sequías, al tiempo que los climas regionales sufren alteraciones drásticas.

Un estudio realizado hace poco por Rahmstorf demuestra que la probabilidad de que se produzca una ola de calor como la que devastó Rusia en 2010 resulta hoy cinco veces mayor, como consecuencia del calentamiento acumulado desde entonces. «Se trata de un factor descomunal», advierte. Otra investigación reciente achaca al deshielo en el Ártico el caluroso invierno que cayó sobre EE.UU. entre 2011 y 2012, que batió marcas en aquel país, al mismo tiempo que el frío europeo hacía lo propio. Como posible explicación, puede argumentarse que el calor acumulado en el Ártico a causa de la disminución de la banquisa se li-





bera en otoño, lo cual perturbaría los gradientes de presión atmosféricos. En consecuencia, los meandros de la corriente en chorro se volverían más pronunciados y permanecerían en el mismo lugar durante períodos más prolongados. Así, mientras el nordeste de EE.UU. se deleita con un invierno benigno, dichos meandros provocarían temperaturas gélidas en Europa.

La situación se complica aún más si tenemos en cuenta el potencial de retroalimentación de algunos mecanismo ecológicos. En la zona occidental de EE.UU. y Canadá, el aumento de las temperaturas ha traído una epidemia de escarabajos del pino de montaña. Los insectos han aniquilado cientos de miles de hectáreas de árboles, lo que amenaza con transformar esos sumideros naturales de carbono (árboles sanos que absorben CO_2) en un foco de emisiones (árboles muertos en descomposición). En Alaska, un período cálido fue la causa del primer incendio que asoló la tundra de North Slope en 7000 años, lo cual aceleró el derretimiento del permafrost y las emisiones de carbono en la zona. En Siberia, el calentamiento está comenzando a transformar vastos bosques de alerces en tierras de abetos. Los primeros pierden sus hojas aciculares en invierno, lo que permite que la cubierta de nieve refleje la radiación solar. Los abetos, por el contrario, conservan sus agujas y absorben el calor del sol antes de que llegue la nieve, según explica el ecólogo Hank Shugart, de la Universidad de Virginia. Según sus estimaciones, los mecanismos de retroalimentación derivados de los cambios en la vegetación podrían, por sí solos, incrementar la temperatura del planeta en 1,5 grados centígrados: «Estamos jugando con fuego», sentencia.

La pesadilla particular de Nisbet comienza con un aumento de las emisiones de metano y un verano muy caluroso que causa incendios masivos, los cuales inyectan más carbono a la atmósfera. El humo y la niebla contaminante envuelven Asia Central y amortiguan los monzones, lo que provoca cosechas ruinosas en China e India. Al mismo tiempo, en el Pacífico tropical, un intenso El Niño de aguas inusualmente cálidas produce sequías en el Amazonas e Indonesia. Los bosques tropicales y las turberas también se incendian y liberan aún más CO_2, lo cual acelera el calentamiento. «Es un escenario posible», apunta Nisbet. «Podríamos ser más frágiles de lo que pensamos.»

Pero ¿qué intensidad pueden alcanzar esos mecanismos de retroalimentación? Los modelos climáticos, útiles para explicar el pasado y el presente, tropiezan al predecir el futuro. «La gente puede conceptualizar esos cambios bruscos mejor que los modelos», opina Schuur. Pero aunque el planeta se encontrase ahora en un punto de inflexión, añade, nosotros podríamos no reconocerlo como tal.

Lo más inquietante en lo que concierne a la política climática es que la ciencia no cuenta con respuestas definitivas. «Conocemos la dirección, pero no la velocidad», apunta Manning. Sin embargo, los expertos insisten en que las incertidumbres no justifican la pasividad; antes bien, reafirman la necesidad de una campaña mundial inmediata para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que revelan la gravedad de los riesgos que implicaría un cambio climático rápido. «Estamos haciendo un experimento a escala geológica análogo a los grandes acontecimientos pasados, por lo que cabe esperar que las mismas causas provoquen efectos similares», concluye Nisbet.

A ello se debe que Hansen no pueda mirar a sus nietos sin convertirse en un activista en su nombre: «Sería inmoral dejar a esos chicos un sistema climático fuera de control».

PARA SABER MÁS

Abrupt climate change. Programa Científico sobre el Cambio Climático y Subcomité de Investigación sobre el Cambio Climático de EE.UU., Servicio de Inspección Geológica estadounidense. Diciembre de 2008. Disponible en **downloads.climatescience.gov/sap/sap3-4/sap3-4-final-report-all.pdf**

Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaption. Grupos de trabajo I y II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, 2012. Disponible en **ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-All_FINAL.pdf**

Paleoclimate implications for human-made climate change. James E. Hansen y Makiko Sato en *Climate change: Inferences from paleoclimate and regional aspects*. Dirigido por André Berger et al. Springer, 2012.

Vídeo realizado por Katey Walter Anthony, de la Universidad Fairbanks de Alaska, donde se muestra la combustión de metano liberado durante la fusión del permafrost: **www.youtube.com/watch?v=YegdEOSQotE**

BERNHARD EDMAIER, PHOTO RESEARCHERS, INC. (*permafrost en Islandia*); JAMES BALOG, EXTREME ICE SURVEY (*glaciar de Trift*); JAN TOVE JOHANSSON (*isla de Spitsbergen*)

Greg Wilson lidera el proyecto Software Carpentry, que enseña técnicas básicas de programación a científicos e ingenieros.

Jorge Aranda obtuvo su doctorado en la Universidad de Toronto y ha investigado en la Universidad de Victoria. Actualmente trabaja como desarrollador de programas para la compañía de análisis de datos Terapeak.



INFORMÁTICA

Ingeniería empírica de programas

La investigación científica sobre las diferentes formas de desarrollar programas revela nuevas posibilidades para mejorar los códigos informáticos

Greg Wilson y Jorge Aranda

Hace tiempo que la ingeniería de programas informáticos, o ingeniería de *software*, viene considerándose a sí misma una ciencia compleja. Después de todo, ¿qué puede resultar más complicado que una secuencia de ceros y unos? Sin embargo, el riguroso examen de las relaciones de causa y efecto que caracteriza al método científico ha sido mucho menos usual en este campo que en otras disciplinas supuestamente más ligeras, como la mercadotecnia.

Cada vez más investigadores opinan que la ingeniería de programas se encuentra en estos momentos en una encrucijada similar a la que vio nacer a la medicina basada en datos probatorios, cuando la comunidad sanitaria comenzó a analizar con rigor sus propias prácticas y a distinguir entre las que realmente funcionaban y las que no eran más que pura charlatanería. En informática, el resultado ha sido una floreciente área de investigación que ha dado en llamarse *ingeniería empírica de programas*. A medida que ha aumentado el interés por ella, sobre todo durante la última década, esta nueva disciplina ha comenzado a tomar prestadas y a adaptar para sí técnicas propias de campos tan diversos como la antropología, la psicología, la ingeniería industrial y la prospección de grandes cantidades de datos (minería de datos).

El objetivo no podía situarse más alto. La industria informática emplea a decenas de millones de personas en todo el mundo. Incluso un pequeño aumento en la productividad se traduce en miles de millones de beneficio al año. Gracias a las técnicas de programación aterrizan nuestros aviones, se diagnostican enfermedades y se evalúa la riqueza de las naciones. En consecuencia, incrementar su fiabilidad no se reduce ni mucho menos a una cuestión académica.

ESTADO ACTUAL

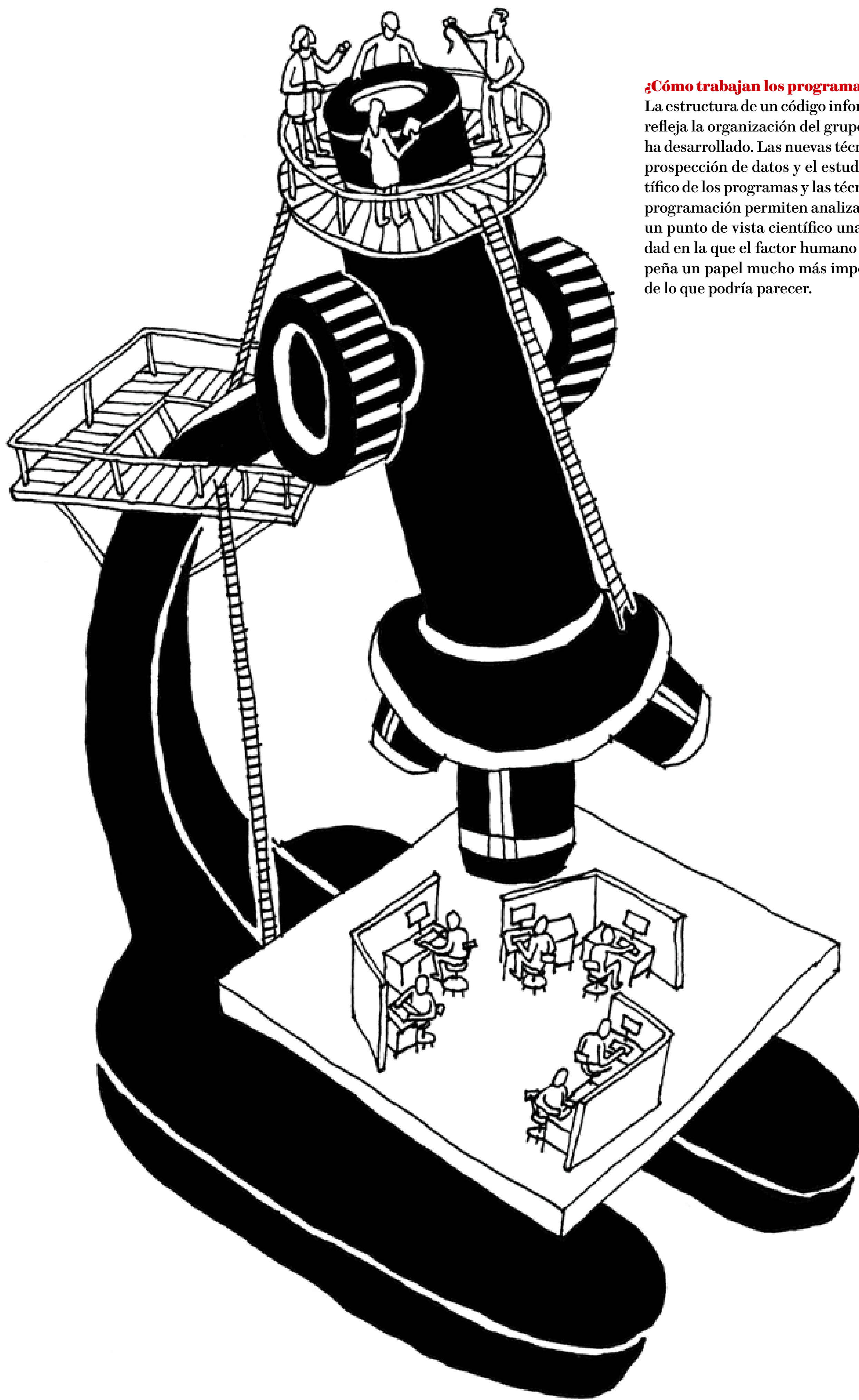
En líneas generales, quienes se inclinan hacia el estudio empírico de la programación lo hacen desde uno de dos ángulos. Para unos, la expresión «ingeniería de programas» siempre ha resultado algo presuntuosa: en la práctica, muy pocos informá-

EN SÍNTESIS

La programación constituye una actividad característica de nuestra época que ha generado todo un canon de creencias y prácticas, algunas de ellas carentes de base científica.

Solo recientemente han comenzado a aplicarse al ámbito de la informática las herramientas que ofrecen el método científico, la psicología y las ciencias sociales.

La ingeniería empírica de programas persigue conformar un conocimiento riguroso y basado en la experiencia sobre los códigos informáticos y las técnicas de programación.



¿Cómo trabajan los programadores? La estructura de un código informático refleja la organización del grupo que lo ha desarrollado. Las nuevas técnicas de prospección de datos y el estudio científico de los programas y las técnicas de programación permiten analizar desde un punto de vista científico una actividad en la que el factor humano desempeña un papel mucho más importante de lo que podría parecer.

AMERICAN SCIENTIST

ticos analizan científicamente sus programas de la misma manera en que un ingeniero examina la resistencia estructural de un puente o las resonancias de un circuito eléctrico. Antes bien, la programación vendría a ser un arte técnica del estilo de la arquitectura, en la que el factor humano constituye un objeto de estudio (algunos dirían *el* foco de estudio) importante. Los cineastas quizás asocien la idea de programador con la de un veinteañero solitario que, agazapado en el garaje de la casa de sus padres, pasa las noches pirateando sistemas ajenos. En la vida real, sin embargo, la mayoría de los programadores trabaja junto con otras personas en grupos que se rigen por pautas tan humanas como las de cualquier otro sector. Tales conductas pueden —y deben— examinarse a la luz de las herramientas empíricas, y a menudo cualitativas, que nos brindan las ciencias sociales y la psicología.

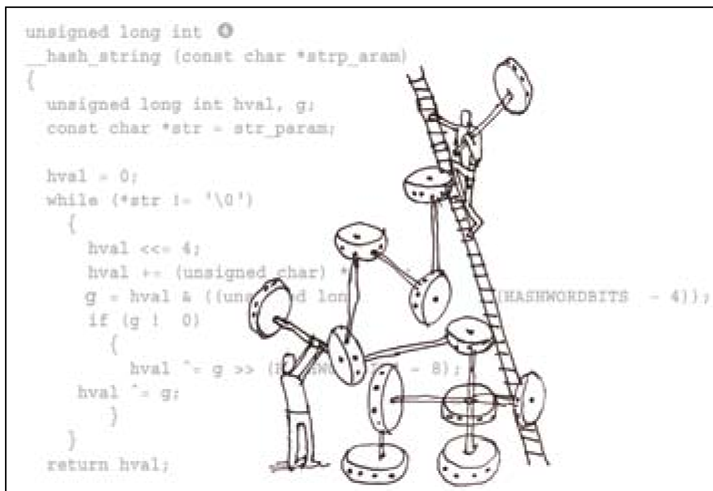
El otro bando suele centrarse más en el «qué» que en el «quién». Aparte de *software*, los programadores generan todo tipo de productos digitales: informes de errores, mensajes de correo electrónico, esquemas de diseño, etcétera. Mediante las mismas técnicas de prospección de datos que Amazon emplea para recomendar libros y que los astrónomos utilizan para encontrar cúmulos de galaxias, los investigadores en ingeniería de programas inspeccionan esos productos digitales en busca de patrones reveladores. ¿Se correlaciona el número de cambios realizados en un programa con el número de errores que este presenta? Si en el desarrollo de un nuevo programa participan varias personas, ¿mejora el resultado (debido a que un mayor número de individuos detecta mejor los fallos) o empeora (como consecuencia de un problema de comunicación)? Un signo de la rapidez con la que están madurando estos métodos lo hallamos en el gran número de repositorios de datos que han aparecido durante los últimos años, como el Software Artifact Infrastructure Repository, de la Universidad de Nebraska, los archivos del muy influyente Laboratorio de Ingeniería de Software de la NASA, o el CeBASE, subvencionado por la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU., el cual archiva datos de proyectos y las lecciones aprendidas durante su desarrollo. Todos ellos han sido diseñados con el objetivo de compartir datos y, con ello, facilitar la labor de los investigadores.

Las preguntas que estamos interesados en resolver abarcan un espectro tan amplio como las que podría plantearse un antropólogo en su primer contacto con una cultura desconocida. ¿Cómo se aprende a programar? ¿Puede predecirse el éxito futuro de un programador mediante un test de personalidad? ¿Afecta la elección del lenguaje de programación a la productividad? ¿Resulta posible medir la calidad del código? ¿Sirve la prospección de datos para identificar errores de programación? ¿Qué es más eficaz, diseñar con detalle un código por anticipado o ir adaptándolo semana a semana a medida que lo vamos escribiendo? Hoy ya disponemos de datos suficientes para responder tales preguntas. Al mismo tiempo, estamos aprendiendo a abordar muchas más.

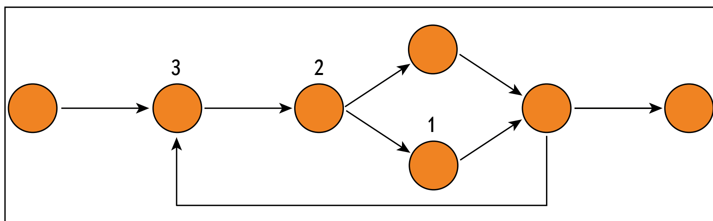
Nuestro campo de investigación debe también hacer frente a la clase de cuestiones fundamentales que definen toda nueva disciplina. ¿Cómo determinar la validez de un conjunto de datos? ¿Cuándo pueden extrapolarse las conclusiones extraídas en cierto contexto —un equipo de programación o cierto proyecto— a otro? Y algo fundamental: ¿qué técnicas resultan más apropiadas para responder a cada tipo de pregunta?

Algunos de los descubrimientos más apasionantes al respecto se describen en el libro *Making software: What really works, and why we believe it* («Programar: Lo que realmente funciona y por qué creemos en ello», O'Reilly Media, 2011), dirigido por Andy Oram y uno de nosotros (Wilson). En él, más de 40 autores presentan los principales resultados de su trabajo. En lo que sigue, citaremos parte de esas investigaciones con el objetivo de dar una visión general del progreso que ha experimentado este campo, así como para demostrar has-

a. Código fuente



b. La complejidad ciclomática de McCabe asociada código fuente de la figura superior es igual a 3



c. La métrica de Halstead incluye varias magnitudes

Longitud	97
Volumen	526
Nivel	0,036
Número de discriminaciones mentales	14.490

Existen numerosas formas de medir la complejidad de un código informático. La métrica más sencilla para el fragmento de código en lenguaje C que aparece en la figura superior (*a*) viene dada por el número de líneas. La siguiente métrica más sencilla corresponde al número de funciones de C (en este caso, una). La complejidad ciclomática de McCabe permite calcular el número de caminos independientes del código y representarlos en un grafo (*b*). La métrica de Halstead evalúa la complejidad a partir del número y el uso de elementos textuales, sin referencia a la estructura del programa (*c*). Un estudio reciente se preguntó si esta clase de métricas más refinadas aportaba más información que el número de líneas de código. En líneas generales, los resultados fueron negativos.

ADAPTADO DE: *BEYOND LINES OF CODE: DO WE NEED MORE COMPLEXITY METRICS?*, POR I. HERRAIZ Y A. E. HASSAN EN *MAKING SOFTWARE: WHAT REALLY WORKS AND WHY WE BELIEVE IT*, PÁGS. 125-144, O'REILLY MEDIA, 2011./*AMERICAN SCIENTIST*

ta qué punto esta nueva disciplina constituye un ámbito único para la investigación empírica.

PUNTUACIONES DE CALIDAD

Un buen ejemplo de los resultados que proporciona el enfoque empírico guarda relación con uno de los santos griales de la ingeniería de programas: la capacidad para medir la calidad de un programa informático mediante un examen automatizado de su código fuente; es decir, sin tener que ejecutarlo para proceder a la búsqueda de fallos. Toda técnica capaz de leer un programa y predecir su fiabilidad antes de que el producto haya sido distribuido entre los usuarios ahorraría grandes cantidades de dinero y, probablemente, salvaría también vidas.

Como regla general, podemos decir que la probabilidad de que un programa contenga errores aumenta con el número de líneas de código. Si bien este resultado puede parecer obvio o incluso trivial, no deja de constituir un buen punto de partida para afrontar cuestiones más profundas. No todas las líneas de un código son iguales: tal vez una sume dos y dos, otra integre un polinomio de varias variables y una tercera compruebe si se satisfacen una serie de condiciones que activan una alarma. De manera intuitiva, todo programador cree que ciertas clases de código revisten mayor complejidad que otras y que, cuanto más complicado sea un fragmento de código, mayor será la probabilidad de que contenga errores. Pero ¿puede medirse ese grado de complejidad? Y, en caso afirmativo, ¿serviría esa información para predecir dónde aparecerán los fallos?

Uno de los primeros intentos por afrontar el problema fue llevado a cabo por Thomas J. McCabe, quien ya en los años setenta desarrolló una métrica conocida como *complejidad ciclomática*. McCabe se percató de que a todo programa puede asociarse un grafo cuyas aristas representan los posibles caminos de ejecución del código en cada paso. El grafo más sencillo constaría de una cadena simple, la cual representaría una serie de órdenes sin bucles ni sentencias condicionales. Cada comando IF, por ejemplo, genera un camino alternativo («paralelo»). De acuerdo con esta métrica, cada sentencia IF y cada bucle aumentan en una unidad la complejidad del código.

Otro método muy usado para medir la complejidad de un código nos lo proporciona la métrica de Halstead, descrita en 1977 por Maurice Halstead. Al contrario de la anterior, su definición no se inspira en la teoría de grafos, sino en la teoría de la información. Se basa en una serie de cantidades sencillas, las cuales dependen del número de operadores y operandos de distinta naturaleza incluidos en el código, su número total, cuán fácil resulta distinguir entre unos y otros, etcétera.

Durante los últimos treinta años se han propuesto cientos de métricas de otros tipos. En el capítulo que han escrito para *Making software*, Israel Herraiz y Ahmed E. Hassan emplean técnicas estadísticas para hacer frente a una pregunta muy sencilla: a la hora de predecir el número de fallos, ¿resulta alguna de esas métricas más fiable que simplemente contar el número de líneas de código fuente? En otras palabras: cuando una métrica guarda una fuerte correlación con el número de líneas de código, ¿aporta realmente algún tipo de información adicional?

Como caso de estudio, Herraiz y Hassan analizaron el sistema operativo de código abierto Arch Linux, el cual ofrecía una muestra de 338.831 archivos de código fuente escritos en el lenguaje de programación C. Los autores calcularon las métricas mencionadas arriba y otras varias para cada uno de ellos, con especial atención a los archivos de cabecera (los que constan de declaraciones que ayudan a organizar el código). Encontraron que, para el resto de los archivos —aquellos que realmente llevan a cabo el trabajo—, todas las métricas evaluadas mostraban un alto grado de correlación con el número de líneas de código. El mismo efecto se observaba en todos ellos salvo en los más cortos. Según los investigadores: «Las métricas que miden la complejidad sintáctica no consiguen capturar la complejidad global del programa». Ya se basen en la estructura del programa o en sus propiedades textuales, dichas métricas no hacen más que «pesar» el código de acuerdo al número de líneas que contiene. Con todo, ello no significa que sean inútiles. La métrica de McCabe, por ejemplo, informa a los evaluadores sobre cuántos caminos de ejecución necesitan cubrir sus métodos de prueba.

Como todo resultado negativo, el de Herraiz y Hassan no deja de resultar algo decepcionante. Sin embargo, su ventaja principal reside en el avance que supone para el estudio científico de la programación: la próxima vez que alguien proponga una nueva métrica para medir la complejidad de un programa, dispondrá un test empírico y validado para estimar su efectividad.

DOS MEJOR QUE UNO

La investigación sobre métricas se centra en las propiedades del código. Otra línea de estudio a la que se han dedicado grandes esfuerzos —si no más— versa sobre la manera en que trabajan los programadores. Un caso interesante nos lo proporciona la programación por parejas. Aunque este método ha venido usándose informalmente desde los albores de la programación, su verdadera irrupción en escena tuvo lugar hacia finales de los años noventa. En él, dos programadores se sientan hombro con hombro frente a un mismo ordenador y escriben juntos el códi-



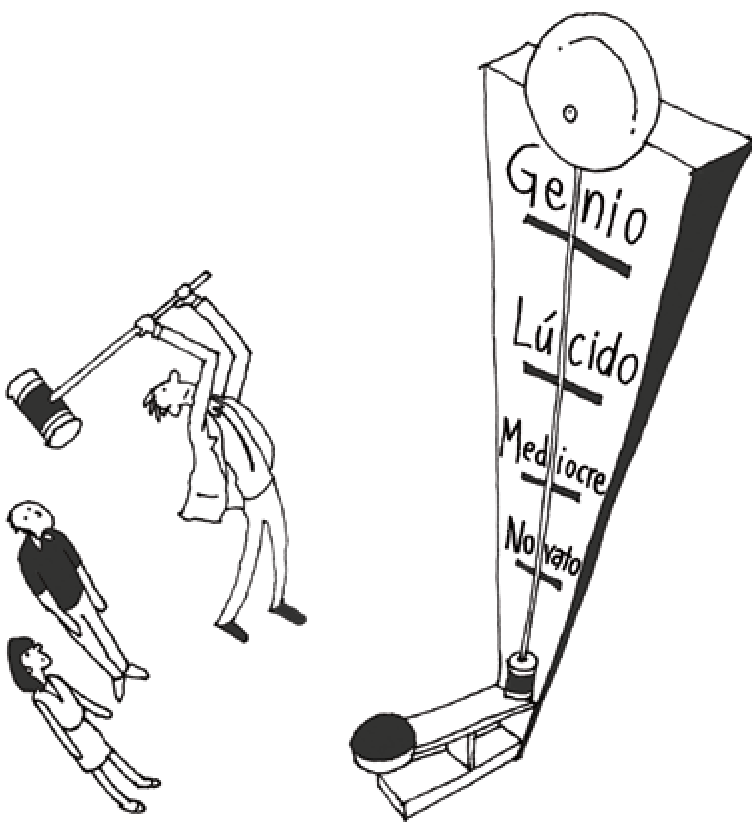
En la programación por parejas, dos personas trabajan en una misma máquina: una de ellas maneja el teclado y la otra observa y sugiere mejoras. Los beneficios de esta técnica pueden evaluarse de manera rigurosa según el tipo de aplicación, las diferentes combinaciones de personalidad, los protocolos para determinar quién desempeña cada función o el tipo de problemas que pueden afrontarse con ella.

AMERICAN SCIENTIST

pero más tarde se recupera y a menudo supera el nivel inicial. Investigaciones adicionales han ahondado en otros aspectos de esta modalidad de programación. Por ejemplo, las parejas más exitosas deciden a menudo no trabajar en equipo durante todo un día, ya que un tándem continuo puede resultar mentalmente agotador. Cambiar de pareja con cierta frecuencia parece ser de ayuda, e invertir los roles de conductor y navegante ayuda a mantener el compromiso.

Los resultados anteriores pueden acabar influyendo incluso sobre el equipamiento del ordenador. Algunos equipos trabajan mejor cuando ambos componentes pueden acceder al teclado. Así pues, ¿por qué no fabricar teclados y ratones dobles? Jan Chong y Tom Hurlbutt evaluaron este método en la Universidad Stanford en 2007; descubrieron que redundaba en mejoras notables, un hallazgo que han corroborado más tarde los estudios realizados por Andreas Höfer, de la Universidad de Karlsruhe, y por la profesora de programación Sallyann Freudenberg. Una vez más, constatamos cómo un estudio inicial de carácter científico plantea preguntas y propone métodos que guían investigaciones posteriores.

Por desgracia, tales trabajos también demuestran que tener razón no siempre basta para cambiar ciertas actitudes. A pesar del cúmulo de pruebas a favor de la programación por parejas, su aplicación en la industria resulta anecdótica. Con frecuencia, tanto directivos como programadores hacen caso omiso de los resultados y se aferran a la idea de que sentar a dos personas en un mismo puesto de trabajo duplicará los costes de plantilla. Este lamentable fenómeno se observa en numerosas disciplinas: algunas personas se resisten con tenacidad a los cambios a pesar de las pruebas y, en ocasiones, aun a riesgo de fracasar.



Evaluar la habilidad y la aptitud de un programador no es sino el difícil arte de diseñar una escala de «nulo» a «genial».

go. El «conductor» maneja el teclado y el ratón, mientras que el «navegador» observa, comenta y sugiere correcciones. Desde hace años, numerosos programadores han observado que esta manera de trabajar parece revertir en una elaboración más rápida y fiable. Si se les preguntara, probablemente responderían que ello se debe a que dos personas se aperciben de más detalles que una sola; que, al no tener que teclear, el navegador dispone de más tiempo para concentrarse; o que el conductor tal vez trabaje con más cuidado al sentirse observado. Pero ¿aporta realmente ventajas la programación en parejas? Y, en tal caso, ¿cuál de las posibles explicaciones es la correcta?

El primer estudio empírico de la programación en parejas fue realizado en 1998 por John Nosek, de la Universidad Temple. El investigador reunió a 15 programadores, 5 de los cuales debían trabajar en solitario y 10 por parejas, a quienes propuso resolver un problema de cierta dificultad en menos de 45 minutos. Los resultados fueron estadísticamente significativos: si bien las parejas necesitaron de media un 60 por ciento más de tiempo que los programadores solitarios, al dividir ese tiempo entre dos, cada individuo había completado la tarea un 20 por ciento más rápido. Y, según el autor, las parejas habían escrito códigos de mejor calidad.

Laurie Williams, de la Universidad de Carolina del Norte, ha resumido varios estudios posteriores realizados sobre grupos de mayor tamaño y en períodos de tiempo más largos. En general, los programadores que trabajan en parejas tienden a producir códigos más sencillos de entender y afrontan los problemas con más confianza. Su productividad puede disminuir al principio, mientras los sujetos se adaptan al nuevo método,

CAZAR TALENTOS

Otro de los grandes fines que persigue la investigación empírica en ingeniería de programas consiste en hallar un método que permita identificar a los mejores profesionales del ramo. Según cierto aforismo muy citado, un buen programador es 28 veces mejor (o 40, 100, u otro número elevado) que la media. Pero, tal y como puntualiza Steve McConnell en *Making software*, el significado preciso de una afirmación de ese estilo siempre será cuestionable, dada la dificultad de definir «mejor» en un ámbito del conocimiento. Sin embargo, todo aquel que se haya dedicado profesionalmente a la programación sabe que las diferencias de productividad y capacidad entre los diferentes programadores pueden resultar abrumadoras. ¿Existe un método para identificar talentos que no pase por contratar a alguien y observar su rendimiento durante un par de años?

Con el objetivo de investigar el talento y la erudición, Jo Erskine Hannay, del Laboratorio de Investigación Simula, ha dividido la cuestión en dos partes. ¿Podemos definir el significado de «buen programador»? ¿Resulta posible determinar de manera fiable si un profesional trabaja «mejor» que otro? Y, en caso contrario, ¿deberíamos rendirnos y abandonar estas cuestiones para centrarnos en aquellas relacionadas con las herramientas y las técnicas?

Hannay ha abordado el asunto desde el prisma de la psicología diferencial. Esta disciplina clasifica a los individuos de

AMERICAN SCIENTIST

acuerdo con características que, como la personalidad, sirven para distinguir entre unos y otros. Aunque en este campo no faltan estudios pseudocientíficos, como los utilizados por algunos departamentos de recursos humanos o páginas web de contactos, hoy contamos con programas de investigación que se fundan en bases sólidas (o, como lo expresaría un psicólogo, disponemos de una validez de constructo del concepto de medida de la personalidad). El «modelo de los cinco grandes» y otros protocolos similares evalúan de manera fiable factores como la extraversión, la cordialidad, la estabilidad emocional o la disposición y capacidad para aprender de la experiencia. Sabemos también que los programadores tienden a poseer ciertos perfiles de personalidad y que esta varía menos que la del promedio de la población. ¿Pueden emplearse estos hallazgos para descubrir buenos profesionales?

La respuesta breve es «no». Extensos metanálisis y estudios posteriores de Hannay y otros investigadores concluyen que la personalidad de un programador no constituye un indicador fiable de su rendimiento. Aquellos que aún creen que existe una relación entre la personalidad y el éxito de un programador cuentan ahora con buenas razones para evaluar críticamente su posición, además de con un apoyo metodológico para hacerlo.

ACREDITACIONES CREÍBLES

Si no podemos predecir quién se convertirá en un buen programador, ¿podemos al menos certificar quién lo es ya? ¿Supondría alguna ayuda exigir a los programadores que se sometiesen a algún método de acreditación? En la mayor parte del mundo industrializado, los ingenieros deben obtener algún tipo de licencia. Una fase preliminar les permite ganar experiencia como ingenieros en prácticas, a lo que sigue un examen más profundo y especializado según su disciplina. A aquellos candidatos que lo superan, se les faculta para ofrecer sus servicios. ¿Podría aplicarse un procedimiento similar al caso de los programadores? ¿Serviría de algo?

Una acreditación de ese estilo debería basarse en una capacitación profesional de conocimientos mínimos y buenas prácticas, como ocurre con los exámenes de ingeniería civil, mecánica o eléctrica. Hoy por hoy, el principal esfuerzo en este sentido lo hallamos en el proyecto Cuerpo de Doctrina en Ingeniería de Programas (SWEBOK, por su acrónimo en inglés) patrocinado por la Sociedad de Computación del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos de EE.UU. Sus intenciones son nobles, y concienzudos profesionales se han volcado en la tarea de establecer un conjunto de posibles estándares que sirva a tal efecto.

Sin embargo, nuestra opinión sobre semejante iniciativa es de escepticismo. Y ello se debe a las mismas razones por las que nos hemos implicado en la investigación empírica de la ingeniería de programas: consideramos que pone el carro delante de los bueyes, ya que aún ignoramos qué factores habrían de definir tales estándares. En lugar de acreditaciones fiables, tememos que un conjunto de Fuertes Convicciones en Ingeniería de Programas acabe generando la falsa impresión de que ya sabemos cómo puede y debe desarrollarse un programa, que disponemos de métodos fiables para determinar su calidad, y que no existen dudas sobre el modo en que un profesional debería abordar su oficio. Dilucidar tales cuestiones constituye justamente el objetivo de la ingeniería empírica de *software*.

En el decenio de los noventa, un grupo de expertos creó el Lenguaje Unificado de Modelización (UML), una notación gráfica para programas informáticos destinada a desempeñar un papel análogo al de los planos de proyecto en ingeniería civil o los



AMERICAN SCIENTIST

Uno de los principales objetivos que persigue la investigación sobre el desarrollo de programas informáticos consiste en hallar métodos para evaluar quién es un «buen» programador. Una posibilidad consistiría en emitir certificaciones, como se hace a menudo con los ingenieros civiles. Sin embargo, ello requeriría conocer qué cualidades y conocimientos deberían valorarse por encima de otros. Determinar esos factores es precisamente una de las metas que se propone la ingeniería empírica de programas.

diagramas de circuitos en ingeniería eléctrica. Pese a un gran ejercicio de propaganda, el UML nunca llegó a tener éxito. Casi cualquier persona que acabe sus estudios de informática aprende UML antes o después, pero muy pocos programadores acaban usándolo de manera voluntaria en su carrera profesional.

En 2007, Mario Cherubini, Gina Venolia, Rob DeLine y Andrew Ko estudiaron la clase de diagramas que realmente emplean los programadores, así como los motivos que les llevan a esbozarlos. Hallaron que, en casi todos los casos, dichos diagramas eran de naturaleza transitoria: buscaban más servir de apoyo a la conversación que dejar un registro documental del proyecto. Además, el coste de convertir unos garabatos en instrucciones formales resultaba mucho mayor que el valor intrínseco de los diagramas. Sin embargo, las empresas que venden herramientas para trabajar en UML ignoran este dato. Con todo, conservamos la esperanza de que una generación más joven de diseñadores acabará por incorporar a su quehacer tanto estos resultados como los métodos de investigación en los que se apoyan.

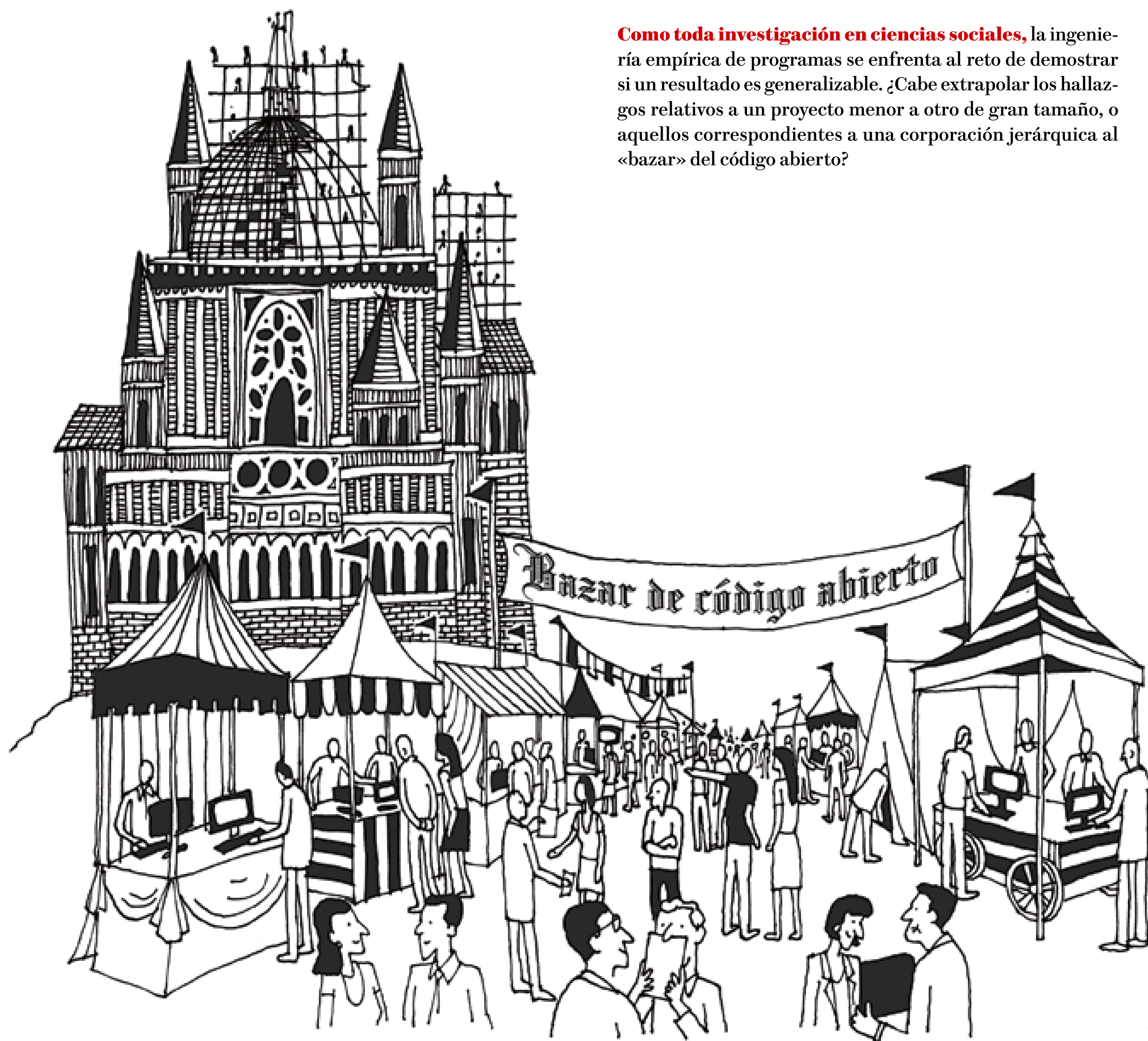
EL CÓDIGO IMITA LA VIDA

En 1967, y solo en parte a modo de ironía, Melvin Conway acuñó la ley que hoy lleva su nombre:

> *Toda organización que diseña un sistema producirá uno cuya estructura es un calco de la estructura de comunicaciones de la organización.*

En otras palabras, si quienes escriben un programa se organizan en cuatro grupos, el resultado poseerá cuatro partes principales.

Nachi Nagappan, Christian Bird y otros investigadores de Microsoft Research examinaron la validez de la ley de Conway a partir de los datos acumulados durante la elaboración de Windows Vista. Este sistema operativo consta de miles de bibliotecas y archivos binarios interrelacionados. Cuando sobreviene un error, este suele deberse a un defecto en uno de los ficheros binarios o a un problema en la interacción entre ellos. Los investigadores emplearon técnicas de prospección de datos con el objetivo de averiguar qué aspectos de la fase de elaboración



Como toda investigación en ciencias sociales, la ingeniería empírica de programas se enfrenta al reto de demostrar si un resultado es generalizable. ¿Cabe extrapolar los hallazgos relativos a un proyecto menor a otro de gran tamaño, o aquellos correspondientes a una corporación jerárquica al «bazar» del código abierto?

AMERICAN SCIENTIST

del *software* guardaban algún tipo de correlación con sus fallos. Hallaron que, cuando el trabajo obedecía la ley de Conway (cuando la estructura del código reflejaba la del grupo de programadores), el código contenía menos errores. En cambio, si el resultado traspasaba los límites existentes entre los distintos equipos, aumentaba el número de errores.

Llegados a ese punto, Nagappan y sus colaboradores usaron sus datos para *predecir* la propensión a los fallos de distintas partes del código. Al contrario de lo que reza el folclore digital, hallaron que la separación geográfica entre los miembros de un mismo equipo no influía demasiado en la calidad del resultado. Lo más importante, en cambio, era la separación organizativa: cuanto más distantes se hallaban los miembros de un grupo en el organigrama de la compañía, más fallos contenía el código. Este resultado, tan sorprendente como fácil de llevar a la práctica, constituye un ejemplo excelente de ciencia aplicada.

ACCESO ABIERTO

Hoy por hoy, un tremendo impulsor de la investigación empírica en ingeniería de programas es el movimiento defensor del *software* de código abierto, el cual está generando con rapidez una gran cantidad de código accesible para todos y archivos completos de comunicaciones entre sus miembros. Con frecuencia, estos se encuentran en diferentes lugares del planeta, de modo que las colaboraciones se establecen a través de correo electrónico y foros en línea. Los registros del código y las discusiones al respecto pueden consultarse a través de Internet a fin de que toda persona interesada pueda unirse al proyecto en cualquier fase y aporte su pericia, soluciones y sugerencias.

Esos repositorios electrónicos suponen un paraíso para el investigador en ingeniería de programas. Constituyen un registro histórico de la vida de un proyecto, que incluye todos los callejones sin salida y los debates, la asignación de tareas, el desarrollo de una estructura de equipo y gran cantidad de información adicional. Una búsqueda meditada y dirigida permite estudiar cuestiones de todo tipo, como la manera en que los recién llegados al proyecto se adaptan a él. Pueden ponerse a prueba motores que intenten predecir la validez de unas teorías u otras sobre la estructura del proyecto y el desarrollo del código. Los registros de búsqueda e identificación de errores y las relaciones personales implicadas en la resolución de fallos aportan una narración única de la mejora paulatina del código. Antes de que la comunidad de código abierto adoptase tales métodos, acceder a semejante cantidad de información era un lujo reservado a los miembros de las unidades de investigación corporativas.

A medida que se desarrollaba el movimiento de código abierto, surgió la sensación de que se trataba de un caso especial en el ámbito de la programación. Eric Raymond, presidente de la Iniciativa de Código Abierto (OSI), ilustró la diferencia entre los proyectos industriales y los de código abierto al compararlos con una catedral y un bazar. El entorno industrial vendría a ser como una catedral, en la que los proyectos se construyen según planes muy detallados, de acuerdo con una jerarquía, un reparto de funciones, orden y dogma. En cambio, un bazar es animado, sin forma definida, orgánico y perfilado por la agregación de las acciones de la multitud. Los investigadores que extraen sus resultados a partir de los proyectos de código abierto han de enfrentarse al escepticismo de quienes ponen en duda que sus hallazgos puedan generalizarse al resto de la comunidad. Sin embargo, se ha demostrado que las distinciones entre un mundo y otro resultan a menudo ilusorias. Hay catedrales en la esfera del código abierto y bazares en el código cerrado. Se han documentado tendencias similares, tanto sociales como técnicas, en ambos entornos. Y los investigadores han acabado por valorar los beneficios que se obtienen al comparar uno y otro.

El trabajo de Guido Schryen, de la Universidad de Friburgo, y Elliot Rich, de la Universidad estatal de Nueva York en Albany, resulta muy instructivo sobre cómo formular y responder preguntas acerca de ambos mundos. En un artículo de 2010, abordaron una cuestión clave y muy debatida: ¿qué modelo es más seguro? Este aspecto constituye una de las principales preocupaciones de cualquier proyecto que se desarrolle dentro del ámbito de redes. Schryen y Rich examinaron los anuncios de vulnerabilidades y la emisión —o no emisión— de parches (modificaciones para subsanar errores) de 17 paquetes de *software* de amplia difusión. Los partidarios del código abierto han sostenido que una amplia comunidad de programadores conduce a una revisión más exhaustiva y a una mejor respuesta ante los fallos de seguridad. Los proyectos industriales defienden el argumento contrario, pues opinan que dentro del código cerrado existe una mayor motivación para identificar y solucionar esa clase de problemas.

Schryen y Rich clasificaron los paquetes objeto de estudio en categorías como código abierto o cerrado, tipo de aplicación (sistema operativo, servidor de web, navegador de Internet, etcétera) y organización estructurada o dispersa. No solo hallaron que las vulnerabilidades revestían una gravedad pareja en ambos casos, sino que la emisión y calidad de los parches no guardaba ninguna relación con el hecho de que el código fuese abierto o cerrado. En su lugar, el tipo de aplicación resultó ser un factor mucho más relevante a la hora de evaluar las vulnerabilidades y la respuesta a los problemas de seguridad. Por otro lado, las directrices en cuanto a la emisión de parches quedaban determinadas por la política de la organización, no por su estructura. Su estudio ha demostrado que la pregunta sobre qué tipo de código resulta más seguro no era la que había que plantearse. Por supuesto, no esperamos que todas las divisorias que separan el código abierto del cerrado se muestren tan borrosas como en este caso, pero estos resultados revelan cómo la ingente cantidad de información disponible gracias al código abierto puede ponerse al servicio de un uso científico.

Como en toda ciencia aplicada, la medida final del éxito de la ingeniería empírica de programas será el cambio: cambios en las herramientas usadas para desarrollar programas, en las prácticas actuales hacia otras demostrablemente mejores y, sobre todo, en la naturaleza de lo que se acepta o se rechaza en calidad de prueba.

PARA SABER MÁS

Elements of software science. M. Halstead. Elsevier Science Ltd., North-Holland, 1977.

The case for collaborative programming. J. T. Nosek en *Communications of the ACM*, vol. 41, págs. 105-108, 1998.

The influence of organizational structure on software quality: An empirical case study. N. Nagappan, B. Murphy y V. Basili en *Proceedings of the 30th International Conference on Software Engineering*, págs. 521-530, 2008.

Personality and pair programming. J. E. Hannay, E. Arisholm, H. Engvik y D. I. K. Sjøberg en *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 36, págs. 61-80, 2010.

Increasing software security through open source or closed source development? Empirics suggest that we have asked the wrong question. G. Schryen y E. Rich en *Proceedings of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, págs 1-10, 2010.

Making software: What really works and why we believe it. A. Oram y G. Wilson. O'Reilly Media, Sebastopol, CA., 2011.

It will never work in theory. Blog de los autores y otros colaboradores sobre resultados recientes en ingeniería empírica de programas: **neverworkintheory.org**

por Sid Perkins

Lagos helados

El estudio de la acumulación y drenaje de agua en la capa de hielo de Groenlandia podría ayudar a predecir futuros aumentos del nivel del mar

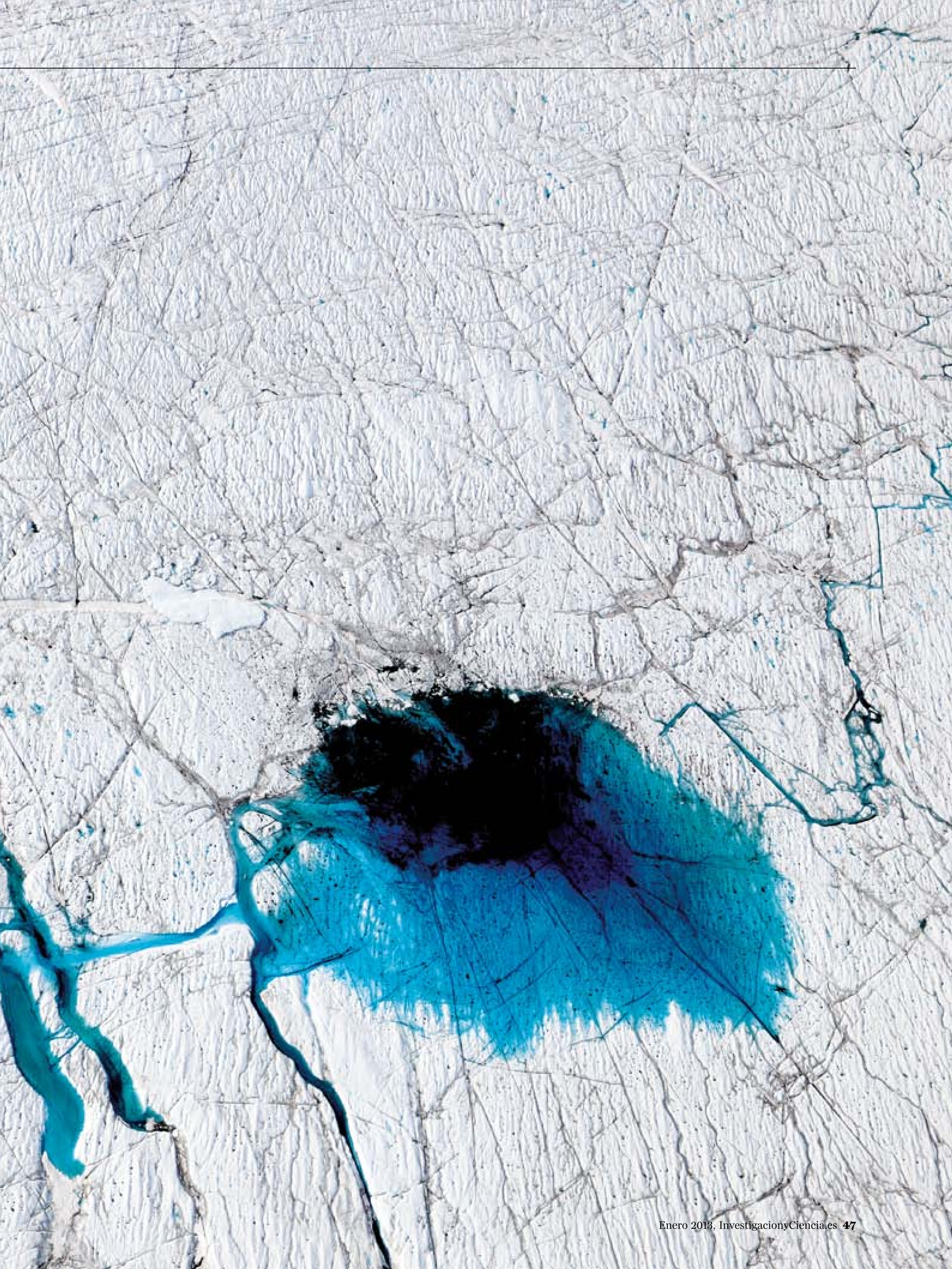
Cada verano, la luz del sol ilumina de forma casi continua gran parte de Groenlandia, la enorme isla cubierta de hielo. En numerosas zonas del casquete glacial, sobre todo a escasa altitud, el agua del deshielo fluye por la superficie y se acumula en charcas y lagos de un azul intenso. A diferencia de los lagos en los que solemos nadar, estas masas de agua pueden desaparecer en poco tiempo: un lago con un volumen doce veces superior al de un gran estadio puede vaciarse a través de una grieta en el hielo en solo noventa minutos.

Un grupo de investigadores han estudiado en Groenlandia la forma en que los lagos podrían modificar el casquete de hielo y el nivel del mar en el futuro. Han averiguado que, cuando los lagos se vacían de forma repentina, envían el agua del deshielo al sustrato rocoso, donde esta lubrifica la migración de la capa de hielo hacia el mar [*véase* «La fusión de la Antártida en directo», por D. Fox; Investigación y Ciencia, septiembre de 2012]. Los científicos temen que, si la región sigue calentándose, este tipo de vaciamientos podría producirse con mayor frecuencia y en un área mucho más amplia del casquete. Ello aceleraría la fragmentación de los glaciares y contribuiría al ascenso del nivel del mar.

Los propios lagos contribuyen también a la fusión, ya que el hielo bajo el agua se derrite dos veces más deprisa que el expuesto al aire en la zona circundante, afirma Marco Tedesco, experto en glaciares de la Universidad de la Ciudad de Nueva York. Mediante un barco dirigido por control remoto, Tedesco está obteniendo datos que revelarán si la oscuridad de los lagos guarda relación directa con su profundidad. Esa información podría servir para determinar mejor la profundidad de los lagos observados en las imágenes de satélite y para predecir con mayor precisión la velocidad a la que se derrite el casquete.

Por otro lado, se está comparando la velocidad a la que se funde el hielo superficial con el caudal de los ríos alimentados por el agua de deshielo. Si esas dos variables divergen de forma sustancial, la diferencia podría indicar qué parte del agua derretida se está acumulando bajo el casquete, donde puede acelerar el movimiento del hielo hacia el mar.

JAMES BALOG



por Daniel Cassany

Daniel Cassany es profesor de análisis del discurso en la Universidad Pompeu Fabra e investigador sobre lectura, escritura y aprendizaje en diferentes contextos.

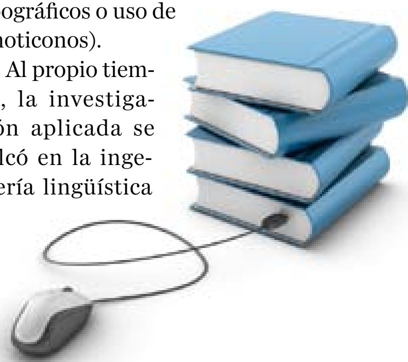


¿Sabemos leer en la Red?

El internauta medio desconoce los elementos básicos de la arquitectura digital y a menudo carece de capacidad de comprensión crítica

¿Cómo leemos y escribimos en Internet? Las primeras investigaciones sobre esta cuestión corresponden a la época en que teníamos más ordenadores que conexión a la Red. Adoptaron una perspectiva generalista y contrastiva: comparaban la pantalla y el teclado con el papel y el lápiz. Desde varias disciplinas se destacó el carácter hipertextual (textos rotos en pedazos y conectados entre sí mediante vínculos), intertextual (varios documentos enlazados entre sí), multimodal (textos que mezclan prosa, fotos o iconos) o virtual (acceso indirecto, imposibilidad de «ver» la integridad del texto o de imprimirlo) de la lectura. También se confirmó que los procesadores (con sus funciones de formatear, copiar, pegar, mover y corregir textos) liberaban a los autores de las tareas más mecánicas de la redacción y permitían que estos se concentraran en lo más estratégico, como la elaboración de las ideas y la coherencia textual, lo cual indirectamente podía incrementar la calidad del escrito.

Con la diseminación de Internet, la lingüística apuntó hacia ámbitos más específicos. Pasaron a describirse los nuevos géneros sincrónicos (chat, juego de rol) o asincrónicos (correo electrónico, foro, web, blog, wiki, muro de perfil), las formas de cortesía usadas en la interacción digital (preferencia del *tú*, estilo directo, párrafos breves) o las formas espontáneas y no normativas de «escritura dialectal», surgidas con los SMS, los comentarios en foros o los chats (reducción vocálica, simplificación ortográfica, ausencia de tildes, juegos tipográficos o uso de emoticonos).



Al propio tiempo, la investigación aplicada se volcó en la ingeniería lingüística o las industrias de la lengua, es decir, la adaptación a la Red del saber léxico y gramatical disponible. Así surgieron asombrosas aplicaciones en línea (correctores, traductores, analizadores, diccionarios), potentes, eficaces y gratuitas, con interfaces muy sencillas que esconden su complejidad interna y que cualquiera puede usar mediante unos pocos clics, pero que ofrecen buenos resultados solo si saben manejarse con finura.

También la psicología, el documentalismo y la mercadotecnia han explorado los aspectos de la lectura que les conciernen. La psicología ha rastreado el comportamiento ocular ante la pantalla, para estudiar cuestiones muy técnicas del proceso lector: descubrimos así que dedicamos más tiempo a ver las fotos, el encabezado o la barra de navegación que a procesar la prosa, o que nos fijamos solo en una parte pequeña del texto (entre el 20 y el 28 por ciento). También se ha concluido que la supuesta capacidad de procesamiento en serie o de multitarea asociada a los internautas más experimentados tiene límites cognitivos: al tener varias ventanas abiertas en la pantalla y saltar de una a otra, se incrementa el tiempo necesario para cumplir con cada tarea, así como el número total de errores.

Los documentalistas han estudiado la utilización de los motores de búsqueda o la navegación a través de la web, mediante el registro y análisis secuencial de las instrucciones que vamos dando al ordenador. De este modo, se ha esbozado el perfil de un internauta medio, más ingenuo o torpe de lo que parece, que no sabe navegar de la manera más directa: prefiere el lenguaje natural a los términos controlados (preestablecidos y empleados por los profesionales para etiquetar y recuperar datos) y desconoce elementos fundamentales de la arquitectura digital, como la distinción entre resultados patrocinados o libres, el uso de los operadores booleanos, la estructura jerárquica de una web o la composición de un hipervínculo.

Las empresas de comercio electrónico han financiado numerosos estudios para averiguar los hábitos de consumo de los internautas, sus preferencias a la hora de elegir una web para comprar o sus criterios para navegar. Los resultados sugieren que las webs más fiables son las conocidas (o relacionadas con alguien conocido), correctas y claras, actualizadas y sin vínculos rotos, que atienden con rapidez y presentan un diseño atractivo. En esta misma línea, investigaciones educativas de corte etnográfico sugieren que muchos jóvenes —y quizá también algunos adultos— carecen de la capacidad de comprensión crítica necesaria para distinguir en la Red una opinión de un hecho empírico, una prueba científica de un alegato religioso o un anuncio comercial de una noticia periodística.

Algunos trabajos recientes, especulativos, exploran los efectos secundarios que provoca el contacto con la Red. Puesto que nuestro cerebro es plástico y se adapta a diferentes contextos y hábitos, sugieren que al acostumbrarnos a la rapidez, interactividad e inmediatez de los estímulos digitales podemos estar perdiendo parte de nuestra capacidad de atención sostenida o de hábito de lectura profunda, conquistados con años de práctica lenta de la lectura. Para otros autores, esta es solo una mirada prejuiciosa e interesada, enraizada en una tradición lectora en papel que se está muriendo.

A modo de resumen, si a principios del siglo XXI la separación metafórica entre nativos e inmigrantes digitales resumía la distinción categórica entre los lectores de papel o pantalla según su fecha de nacimiento, la formulación actual de visitantes y residentes digitales sugiere un *continuum* variable y una mirada más dúctil y compleja sobre una realidad tremendamente cambiante.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana

MENTE y CEREBRO Cuadernos

Precio por ejemplar: 6,90€

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

por Jesús Zamora Bonilla

Jesús Zamora Bonilla es catedrático de lógica y filosofía de la ciencia en la UNED.



¿Puede la ciencia explicarlo todo?

Una buena explicación es aquella que nos permite razonar de manera más eficaz

La investigación científica comienza siempre con algunos interrogantes. A menudo nos preguntamos cosas del tipo «¿Cómo evitar la recesión?» o, tal vez, «¿Qué utilidad podríamos darle a esta propiedad que acabamos de descubrir en los superconductores?». También intentamos responder cuestiones como «¿Cuál era la disposición de los continentes hace 1000 millones de años?» o «¿Hay algún elemento estable con un número atómico mayor que 120?». Pero la mayor parte de las principales preguntas que han guiado y guían la investigación científica son diferentes: se centran en un *por qué*: «¿Por qué las manzanas maduras caen de los árboles pero la Luna no cae del cielo?», «¿Por qué las cenizas pesan más que la madera que hemos quemado?», «¿Por qué heredan los nietos algunos rasgos de sus abuelos, cuando esos rasgos no estaban presentes en los padres?», «¿Por qué un chorro de electrones genera un patrón de interferencias al pasar a través de una doble rendija, si cada electrón pasa solo por una de ellas?».

Mediante el primer tipo de preguntas procuramos mejorar nuestra capacidad de adaptación al entorno, ampliar nuestras posibilidades de *acción* o de elección. El propósito del segundo tipo de preguntas es averiguar cómo es el mundo que nos rodea, *describirlo*. Con las de la tercera clase buscamos más bien explicar los hechos, es decir, *entenderlos*. Por desgracia, no parece que esté demasiado claro en qué consiste eso de «explicar», qué hacemos exactamente con las cosas al entenderlas y, sobre todo, por qué son tan importantes para nosotros los porqués, qué ganamos con ellos que no pudiéramos obtener tan solo con respuestas a las dos primeras clases de preguntas (las prácticas y las descriptivas).

En la noción de explicación se mezclan de manera intrigante aspectos objetivos y subjetivos.



Al fin y al cabo, comprender algo es un suceso psicológico, algo que ocurre en la mente de alguien. En cambio, cuando intentamos dar una explicación de un hecho, solemos acudir a diversas propiedades del hecho en cuestión. ¿Por qué algunas de esas propiedades tendrían que ser más relevantes que otras a la hora de conducirnos al estado mental que llamamos «comprender»?

Las principales teorías que ofrece la filosofía de la ciencia sobre la naturaleza de las explicaciones se centran, precisamente, en los aspectos objetivos. Por ejemplo, se considera que un hecho ha sido explicado cuando se ha deducido a partir de leyes científicas (Carl Hempel), cuando se ha ofrecido una descripción apropiada de su historia causal (Wesley Salmon) o cuando se muestra como un caso particular de leyes más generales, que abarcan muchos otros casos en apariencia diferentes (Philip Kitcher). También se considera que algunos hechos —sobre todo en biología— son explicados cuando se pone de manifiesto su función o cuando —en las ciencias humanas— se ponen en conexión con las intenciones o los valores de los agentes implicados. Hablamos en estos dos casos de «explicación teleológica» o «explicación funcional». Estas concepciones de la explicación ya no son tan populares como en otras épocas, pero,

en mi opinión, ambas serían ejemplos de «explicación causal».

Pues bien, la cuestión es, ¿por qué pensamos que entendemos un fenómeno precisamente cuando conocemos sus causas o su relación con otros fenómenos aparentemente distintos, más que cuando conocemos su duración, localización, posibles usos o cualquier otra de sus propiedades? Una posible respuesta, tradicionalmente asociada al pensamiento de Aristóteles, sería la que identifica el significado de «comprender» con «conocer las causas»; sin embargo, ello da la impresión de ser poco más que un juego de palabras. Otra posibilidad, tal vez más coherente con las intuiciones del viejo filósofo griego, consistiría en concebir nuestros conocimientos no como una mera enciclopedia o una simple pirámide, en la que cada pieza se va acumulando a las demás, sino como una red de inferencias, en la que el valor de cada ítem depende sobre todo de lo útil que sea para llevarnos a más conocimientos cuando se lo combina con otros ítems. A veces conseguimos añadir a nuestros conocimientos una pieza que produce un resultado especialmente feliz: gracias a ella los enlaces inferenciales se multiplican y a la vez se simplifican, haciéndonos más fácil el manejo de la red. Es decir, entendemos algo tanto mejor cuanto más capaces somos de razonar sobre ello de manera sencilla y fructífera.

La última frase contiene un matiz importante sobre los conceptos de explicación y comprensión: no son absolutos, pues siempre cabe la posibilidad de que algo que ya hemos explicado lo expliquemos con mayor profundidad o de manera más satisfactoria. Ello resulta obvio cuando nos fijamos en que, para explicar por qué ciertas cosas son como son, tenemos que utilizar a modo de premisa en nuestro razonamiento alguna otra descripción. Si queremos explicar por qué las órbitas de los planetas obedecen las leyes de Kepler, emplearemos como premisa la ley newtoniana que describe cómo se atraen los cuerpos. Esto implica que para explicar algo, necesitamos siempre alguna descripción «explicadora», que, a su vez, podrá ser explicada por otra. Así, la teoría general de la relatividad explica por qué los cuerpos obedecen con gran aproximación la ley de la gravedad. Una consecuencia inmediata de este hecho trivial es que nunca será posible explicarlo todo.

Insistamos: para explicar científicamente cualquier fenómeno o cualquier peculiaridad del universo recurrimos a leyes, modelos, principios, que son, al fin y al cabo, afirmaciones que dicen que el mundo es así o asá, en vez de ser de otra manera. Imaginemos que ya hubiéramos descubierto todas las leyes, modelos o principios científicamente relevantes que haya por descubrir —si es que esta suposición tiene siquiera algún sentido—. Llamemos *T* a la combinación de esa totalidad ideal de nuestro conocimiento sobre el mundo y preguntémonos «¿Por qué el mundo es como dice *T*, en lugar de ser de cualquier otra manera lógicamente posible?». Obviamente, la respuesta no puede

Entendemos algo tanto mejor cuanto más capaces somos de razonar sobre ello de manera sencilla y fructífera

estar contenida en *T*, pues ninguna descripción se explica a sí misma. Por tanto, o bien deberíamos hallar alguna nueva ley, modelo o principio, *X*, que explicase por qué el mundo es como dice *T*, o bien hemos de reconocer que no es posible para nosotros hallar una explicación de *T*. Pero lo primero contradice nuestra hipótesis de que *T* contenía todas las leyes y principios relevantes para explicar el universo; así que debemos concluir que explicar *T* (la totalidad de las leyes de la naturaleza) está necesariamente fuera de nuestro alcance.

Dos reacciones frecuentes a esa situación son pensar que el universo es, en el fondo, inexplicable, o bien que la explicación última del cosmos no puede ser científica. Lo primero resulta trivial si se entiende en el sentido del párrafo anterior (no puede haber una teoría científica que lo explique todo), pero también banal en cuanto recordamos que explicar no es cuestión de todo o nada, sino de más o menos. Digamos que la inteligibilidad se parece más a la longitud que a la redondez: esta segunda propiedad tiene un límite (el de un círculo o una esfera perfectos), pero la primera no. De modo análogo, lo importante es en qué medida hemos conseguido comprender el universo o sus diversas peculiaridades, no si lo hemos comprendido en su totalidad. Es decir, la pregunta adecuada es *en qué grado* hemos conseguido simplificar e interconectar un conjunto cada vez más amplio y variado de conocimientos, no si los hemos reducido a la más absoluta simplicidad.

Por último, pienso que la idea de una explicación extracientífica es meramente un sueño. Para que algo constituya una explicación debe permitirnos deducir aquello que queremos explicar: las leyes de Newton explican las de Kepler porque estas pueden ser calculadas a partir aquellas. Como ha aclarado Richard Dawkins, la información que queremos explicar debe hallarse contenida en la teoría con la que la explicamos; por tanto, una teoría que explique un gran número de cosas debe contener gran cantidad de información, debe ser en realidad una descripción muy detallada (y a la vez muy abstracta) del funcionamiento del universo. Por ejemplo, los defensores de la teoría del «diseño inteligente» cometen justo este tipo de error al introducir la hipótesis de un designio divino, pues a partir de esa hipótesis resulta sencillamente imposible derivar los detalles de lo que queremos explicar, ni siquiera sus aspectos más generales.

Dicho de otra manera, los *porqués* no son en realidad una categoría separada de los *cómos*, sino más bien una clase de estos: corresponden a los *cómos* que nos ayudan a simplificar y ampliar nuestros conocimientos. Por tanto, ninguna hipótesis merece ser llamada explicación si no permite responder, al menos en algún aspecto relevante, a la pregunta «¿Cómo ha ocurrido esto?». En resumen, nadie sabe si existen realidades que la ciencia no podrá nunca conocer. Lo que sí sabemos es que esas realidades, en caso de que existan, nunca nos permitirán explicar nada.

PARA SABER MÁS

La naturaleza de la explicación. Peter Achinstein. Fondo de Cultura Económica, 1989.
De los efectos a las causas. Sobre la historia de los patrones de explicación científica. Sergio Martínez. Paidós/UNAM, 1997.
Scientific understanding: Philosophical perspectives. Dirigido por Henk de Regt, Sabina Leonelli y Kai Egner. University of Pittsburg Press, 2009.
«Scientific explanation», en The Stanford Encyclopedia of Philosophy. James Woodward. Stanford University, 2011; **plato.stanford.edu/archives/win2011/entries/scientific-explanation**
El comienzo del infinito: explicaciones que transforman el mundo. David Deutsch. Intervención Cultural, 2012.

PALEONTOLOGÍA

EL AVE MÁS EXTRAÑA

Unos fósiles descubiertos hace poco revelan la sorprendente historia evolutiva de los pingüinos

R. Ewan Fordyce y Daniel T. Ksepka

NOVIEMBRE EN LA ANTÁRTIDA: EL HIELO ESTÁ MENGUANDO. LOS EMPERADORES se irán pronto a pescar. Pasarán el verano austral deslizándose a través del gélido océano Antártico y buceando hasta más de 500 metros de profundidad en busca de peces, calamares y krill; se atracarán antes de realizar el largo viaje por tierra hasta donde criarán en invierno. Cuando tienen que salir del agua, se impulsan desde ella hasta el hielo. Este breve lapso entre el agua y el hielo es el único momento en que experimentan lo que tan habitual es para la mayoría de las aves: desplazarse por el aire.

Los emperadores y los demás pingüinos son aves extrañas. Aunque tienen plumas, alas, pico y ponen huevos, como todas las aves, presentan un conjunto de características que los distingue claramente de sus amigos emplumados. Las alas han evolucionado hasta convertirse en aletas para nadar; su característica coloración en forma de esmoquin los camufla ante sus depredadores, los de arriba y los de abajo; los huesos densos les proporcionan lastre para sumergirse; unas patas cortas y robustas guían el cuerpo bajo el agua y los ayudan en su tambaleo en tierra, simpático, sí, pero también eficiente energéticamente. Gracias a estas y otras características, los pingüinos dominan el medio marino; muchos, entre ellos el emperador, han colonizado uno de los ambientes más extremos del planeta.

Los paleontólogos se vienen preguntando desde hace mucho de dónde salieron estas peculiares aves y cómo se dispersaron a través del hemisferio sur. Los fósiles descubiertos durante la última década han ayudado a conocer el curso evolutivo de los pingüinos. Y resulta que muchas de las características definitorias de estos animales surgieron en condiciones mucho más benignas que los ambientes extraordinariamente fríos en que solemos imaginárnoslos. Pero no por eso son mayores las posibilidades de que los pingüinos se adapten a un futuro calentamiento. Los nuevos hallazgos dejan claro que la biología y la distribución geográfica de estas aves



EN SÍNTESIS

Los pingüinos son aves raras, incapaces de volar pero excelentes nadadoras y buceadoras. Los biólogos evolutivos se habían preguntado durante mucho tiempo cómo los pingüinos desarrollaron sus peculiares características y cómo algunos lograron conquistar la terriblemente fría Antártida.

Recientes hallazgos de fósiles han permitido reconstruir el pasado evolutivo de estas aves. Se sabe ahora que algunas de las características que les permiten resistir el frío surgieron en ambientes cálidos.

Aunque los pingüinos han sobrevivido a las variaciones climáticas acaecidas durante 60 millones de años, el calentamiento actual puede superar su capacidad de adaptación.

son el fruto de las complejas interacciones, a lo largo de decenas de millones de años, de la deriva continental, los cambios climáticos y la selección natural. Se subraya así que los cambios climáticos rápidos pueden ser peligrosos para los pingüinos actuales.



R. Ewan Fordyce es paleontólogo de vertebrados en la Universidad de Otago, Nueva Zelanda. Centra sus investigaciones en los vertebrados marinos fósiles de Nueva Zelanda, entre ellos pingüinos y ballenas.



Daniel T. Ksepka es paleontólogo de vertebrados de la Universidad del Estado de Carolina del Norte. Su principal línea de investigación se centra en establecer cuál fue la evolución de los pingüinos desde sus antepasados voladores.

UN ORIGEN ANTIGUO

Se sabe de la existencia de pingüinos fósiles desde hace más de 150 años, pero los primeros restos recuperados eran simples fragmentos que aportaban poca información. El primero de los fósiles de pingüino identificado como tal consistía en un único hueso recogido en unas rocas calizas de Nueva Zelanda por un maorí de nombre desconocido. El hueso llegó a manos del anatomista inglés Thomas Henry Huxley. Identificó el fragmento como perteneciente al tobillo de un pingüino ya extinto, mayor que un emperador, que con 90 centímetros de altura y 40 kilogramos de peso es la mayor de las especies actuales. Bautizó al pingüino fósil como *Palaeeudyptes antarcticus*, que significa «antiguo y diestro buzo del Sur». Durante las décadas siguientes aparecieron más fósiles de pingüinos gigantes, en Nueva Zelanda y en otros lugares. Pero, al igual que el hueso del tobillo identificado por Huxley, todos eran restos fragmentarios difíciles de interpretar. Los científicos se quedaban con las ganas de saber cómo vivieron aquellos gigantes, por qué se extinguieron y dónde encajaban en el cuadro general de la evolución de los pingüinos.

El registro fósil de los pingüinos empezó a mejorar a finales de los años setenta del siglo xx, cuando uno de nosotros (Fordyce) se topó con el hueso roto de una pata que asomaba en un acantilado de arenisca cerca de Waimate, en el sur de Nueva Zelanda. Tras eliminar cuidadosamente la matriz rocosa, encontró más huesos de un gran pingüino que vivió hace 27 millones de años. Aquel esqueleto parcial aportó nuevos conocimientos sobre el plan corporal de los pingüinos antiguos, pero era todavía demasiado moderno como para revelar algo sobre el origen del grupo. Los fósiles que permitirían resolver esta cuestión no aparecieron hasta los años ochenta y noventa, cuando se encontraron varios ejemplares correspondientes a las primeras fases de la evolución de los pingüinos en la zona de Waipara, en Nueva Zelanda también. Estos restos, de entre hace 62 y 58 millones de años, pertenecen a pingüinos ancestrales superficialmente parecidos a los cormoranes, con picos largos y finos, y alas flexibles. Pero una inspección más atenta reveló los rudimentos de las características típicas de los pingüinos: los huesos proximales de las alas eran planos y anchos, como los de los pingüinos modernos; el tobillo era ancho y corto, y, en conjunto, los huesos eran más densos que los de las aves capaces de volar.

Tras analizar esos fósiles de protopingüinos, Fordyce, Tatsuro Ando (en aquel entonces estudiante de doctorado suyo en la Universidad de Otago) y Craig Jones, de GNS Science, los asignaron a dos especies de un nuevo género, *Waimanu*, que significa «ave acuática» en maorí. La mayor de esas dos especies, *Waimanu manneringi*, con sus 90 centímetros de altura, tenía un tamaño similar al de un emperador, mientras que *Waimanu tuatahi* debía de alcanzar unos 75, un poco más que un pingüino ojigualdo moderno. Ninguno de los dos parecía capaz de volar; en cambio, ambos sobresalían a la hora de propulsarse por el agua.

Los del género *Waimanu* son los pingüinos más antiguos y arcaicos conocidos. Se hallan también entre los representantes más antiguos de cualquier linaje de aves modernas. Estos pingüinos vivieron poco después del cataclismo con el que concluyó el Cretácico hace 65 millones de años, el que acabó con los dinosaurios y muchas otras criaturas. Según algunos, la catástrofe provocó la extinción de la mayor parte de las aves; solo sobrevivió quizás un puñado de linajes. Si fue así, tuvo que producirse una evolución rápida, en unos pocos millones de años tras el cataclismo, del linaje de los pingüinos y de los demás linajes modernos de aves a partir de un único grupo ancestral. De acuerdo con los datos paleontológicos y los análisis de ADN de las aves actuales, creemos más verosímil que los linajes modernos, incluido el de los pingüinos, se originaran antes del épico cataclismo y, de algún modo, se las apañaran para sobrevivir cuando sus hermanos, los dinosaurios, no pudieron.

Que se hayan encontrado los pingüinos más antiguos en Nueva Zelanda no debe de ser una casualidad. Actualmente viven en sus costas numerosos pingüinos. Hasta la llegada de los humanos, hace menos de mil años, el archipiélago era para las aves marinas un paraíso de clima templado, a caballo entre el Pacífico Sur y el océano Antártico. La región carecía de mamíferos depredadores terrestres y ofrecía espacio para las colonias de cría, con abundante alimento en los mares circundantes.

Los datos geológicos indican que la región ya era adecuada para el modo de vida de las aves marinas a finales del Cretácico —el momento en que debió de comenzar la historia de los pingüinos—, aunque por otros motivos. Hoy en día, Nueva Zelanda es la mayor área emergida de Zelandia, un minicontinente sumergido que se desgajó del antiguo supercontinente de Gondwana hace quizá 85 millones de años. Una vez liberada, Zelandia se desplazó por el Pacífico hacia el nordeste, hasta su paradero final a medio camino entre el Polo Sur y los trópicos, y se llevó consigo plantas y animales, dinosaurios incluidos. A medida que se desplazaba, Zelandia se enfriaba y hundía. Se formaron mares poco profundos sobre las costas sumergidas y surgió una amplia plataforma continental en todo su perímetro. A pesar de su aislamiento de otras masas continentales, Zelandia no salió indemne de la extinción de finales del Cretácico. Muchas de sus especies marinas y terrestres desaparecieron en la hecatombe. Pero lo que fue negativo para esas criaturas, fue positivo para los pingüinos. Con la desaparición de reptiles marinos como los mosasaurios y los plesiosaurios, los pingüinos pudieron nadar en las aguas que rodeaban Zelandia sin tener que padecer a competidores y depredadores.

UNA ADAPTACIÓN CLAVE

Una vez adaptados en Zelandia a la nueva situación, los pingüinos ampliaron enseguida muchísimo sus dominios; se dispersaron a través de miles de kilómetros y colonizaron nuevas zonas climáticas. Los fósiles de *Perudyptes devriesi*, procedentes de Perú, demuestran que los pingüinos se hallaban cerca del ecuador hace unos 42 millones de años, en una de las zonas más cá-

PÁGINAS ANTERIORES: FRANS LANTING; EN ESTA PÁGINA: FUENTE: MARILYN A. FORDYCE (*Fordyce*)

lidas del planeta durante uno de los períodos más tórridos de su historia. Por aquel entonces, la temperatura en Perú era de unos 30 ºC y la temperatura media del océano, entre 6 y 8 ºC superior a la actual. En aquella época merodeaban por las aguas costeras de la isla de Seymour, en la Antártida, pingüinos gigantes como *Anthropornis nordenskjoeldi*. Hace 37 millones de años, los pingüinos habían colonizado prácticamente todas las tierras emergidas de gran tamaño en el hemisferio sur.

Pero ¿por qué tras permanecer confinados en Zelandia durante millones de años los pingüinos se extendieron súbitamente por todo el hemisferio sur hace unos 50 millones de años? Uno de nosotros (Ksepka) descubrió no hace mucho una pista importante para resolver este misterio, una característica de la superficie de los huesos fósiles de las aletas que había pasado inadvertida. El húmero presenta una serie de acanaladuras, difíciles de apreciar entre las marcas asociadas a los tendones y los músculos. Ksepka las observó por primera vez cuando estudiaba las aletas de pingüinos congelados en el sótano del Museo Americano de Historia Natural de la ciudad de Nueva York con el objetivo de descifrar la relación entre las marcas presentes en los huesos fósiles y la anatomía de los tejidos blandos de la aleta. Simultáneamente, otro experto en pingüinos, Daniel Thomas, realizaba una investigación similar en la Universidad de Otago; quería saber cómo evolucionó la capacidad que tienen los pingüinos de regular su temperatura corporal.

Al comparar sus notas, Ksepka y Thomas comprendieron que las acanaladuras se forman allí donde un grupo de arterias y venas presionan contra el húmero. Estos vasos sanguíneos forman un intercambiador de calor por contracorriente denominado plexo arterial del húmero, gracias al cual los pingüinos limitan las pérdidas de calor a través de las aletas y mantienen estable la temperatura corporal en aguas frías. En los pingüinos vivos la sangre caliente procedente del corazón se refrigera en el plexo arterial antes de llegar al extremo de la aleta, y la sangre fría procedente de la aleta se calienta en el plexo arterial antes de llegar al corazón.

El descubrimiento del significado de los surcos presentes en el húmero permitió alcanzar sorprendentes conclusiones sobre el origen de la termorregulación de los pingüinos. Una de las características más notables de la biología actual de los pingüinos es su capacidad de tolerar el frío extremo. En consecuencia, cabría suponer que el plexo arterial evolucionó como una adaptación a ambientes helados. Pero los fósiles cuentan otra historia. Pingüinos como el pequeño *Delphinornis* de la Antártida indican que esta característica apareció hace al menos 49 millones de años. Sin embargo, los antiguos *Waimanu* que vivieron en Zelandia hace 58 millones de años no presentaban ni rastro de ella. En consecuencia, el plexo evolucionó en el lapso de tiempo intermedio, cuando la Tierra era mucho más cálida que en la actualidad. En aquel entonces la Antártida carecía de una capa de hielo perpetua; tenía, en cambio, bosques y un clima templado. Zelandia era aún más cálida.

¿Para qué les servía un plexo destinado a preservar el calor corporal en un mundo así? Aunque la temperatura de las aguas superficiales era elevada, los pingüinos seguramente se alimentaban en las aguas frías de los afloramientos costeros, ricas en nutrientes y, por tanto, en presas potenciales, como peces y calamares. Sin embargo, aprovechar esa abundancia de alimentos tenía un riesgo. El calor se pierde más rápidamente en el agua que en el aire, por lo que un animal de sangre caliente, sin excluir a los buzos humanos, puede padecer hipotermia, si la temperatura del agua es inferior a la corporal, incluso en mares templados. Los pingüinos, de sangre caliente, se enfrentaban al mismo riesgo en las aguas frías de los afloramientos a pesar de la capa aislante de grasa y de las plumas impermeables. Reducir las pérdidas de calor a través de las aletas les habría servido para conservar la temperatura corporal durante las largas expediciones en pos de alimento en aguas frías.

El plexo arterial del húmero podría también haberles ayudado a sobrevivir durante los largos viajes a través del mar abierto que los dispersaron desde Zelandia hasta otros continentes. Proponemos esta hipótesis porque todos los fósiles de la primera oleada de pingüinos hallados fuera de Zelandia presentan dicha característica. Solo mucho más tarde aprovecharían los pingüinos modernos ese mecanismo para invadir las plataformas marinas de hielo que se formaron al enfriarse el planeta.

VARIACIONES SOBRE UN MISMO TEMA

Los pingüinos sufrieron una notable radiación a medida que se expandían por los océanos australes; su evolución creó una gran variedad de formas. Una de ellas, *Pachydyptes ponderosus* («buzo corpulento»), era un verdadero gigante. Solo se le conoce por un puñado de huesos de hace 35 millones de años, procedentes de Nueva Zelanda. Los paleontólogos han estimado que la masa corporal de esta especie superaba los 65 kilogramos —¡podemos imaginarnos la salpicadura de un ave semejante al zambullirse desde un posadero situado en lo alto de una roca!—. En el otro extremo del espectro, *Eretiscus tonnii* («pequeño remero»), un fósil argentino de hace 21 millones de años, tendría una altura de solo 45 centímetros. Quizá llegaban a la costa, como los actuales pingüinos enanos de Nueva Zelanda, en «balsas» compuestas por decenas de aves, comportamiento que reduce el riesgo de depredación.

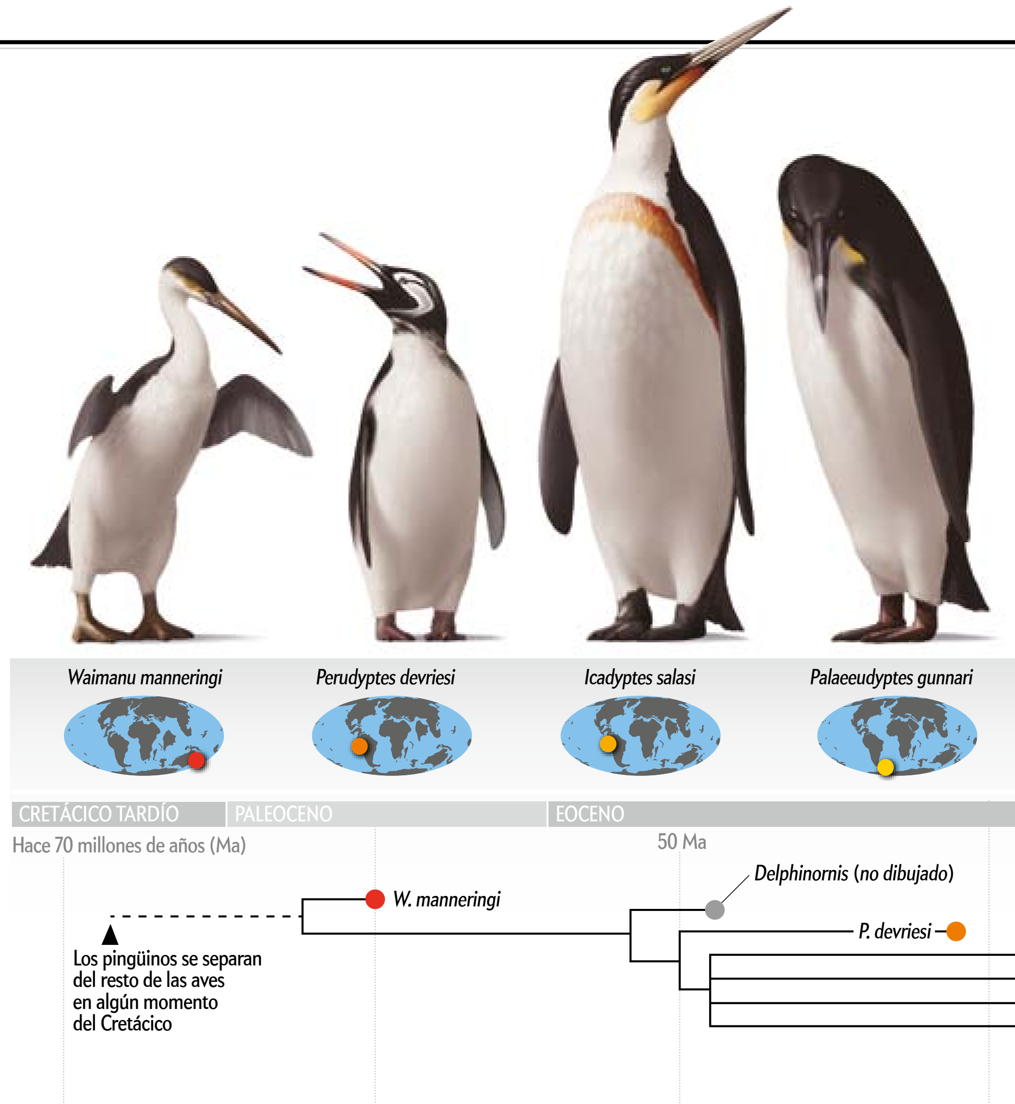
Algunos pingüinos disponían de un armamento mortífero. Hace 36 millones de años, *Icadyptes salasi* («el buzo de Ica», así llamado por una región de Perú) remataba su cuello rodeado por músculos poderosos con un pico reforzado, alargadísimo, listo para empalar un pez o un calamar. Otros vestían extrañas libreas. Ksepka recuerda como si fuera ayer una noche en Lima, cuando Julia Clark, de la Universidad de Texas en Austin, quitaba la roca en torno a un ejemplar muy bien conservado de *Inkayaku paracasensis* («rey del agua») y exponía su piel y plumas de hacía 36 millones de años, un descubrimiento único. El análisis microscópico posterior descubrió indicios de pigmentos grises y pardo-rojizos, un patrón de coloración muy diferente del habitual esmoquin blanco y negro de los pingüinos actuales.

Los antiguos pingüinos no solo adquirieron una gran diversidad de formas en su evolución, sino que se repartieron en un gran número de especies. Los científicos han dado nombre a más de 50 especies fósiles, aparte de las 19 actuales, y en muchos casos tenemos sólidas pruebas de que varias especies de pingüinos ocuparon simultáneamente las mismas zonas. En la isla de Seymour, hasta diez especies aparecen juntas en el registro fósil. Este solapamiento resulta fascinante, pues indica que, para coexistir, cada especie fue capaz de labrarse un nicho ecológico propio en el mismo espacio físico. Por el contrario, hoy no coexisten en una misma zona de cría más de cinco especies.

Los antiguos pingüinos lograron coexistir, en parte, gracias a una diversidad de tamaños mayor que la actual, lo que nos devuelve a aquellos enigmáticos gigantes de Nueva Zelanda. Junto con Ando y Jones, hemos concluido hace poco un detallado estudio de unos ejemplares de hace 27 millones de años, incluido el esqueleto parcial hallado por Fordyce en los años setenta. Aunque se parecen al *Palaeeudyptes* de Huxley, los fósiles pertene-

Una plétora de pingüinos

El estudio de los fósiles y el análisis de ADN de los pingüinos modernos parecen indicar que este peculiar grupo de aves apareció cuando los dinosaurios todavía vagaban por la Tierra. El pingüino fósil más antiguo conocido procede de lo que ahora es Nueva Zelanda y tiene entre 62 y 58 millones de años. El cataclismo responsable de la extinción de los dinosaurios y otros depredadores terrestres y marinos permitió la proliferación de los pingüinos en las aguas que rodeaban al sumergido minicontinente de Zelandia. Luego, hace unos 50 millones de años empezaron a dispersarse de pronto por el hemisferio sur, probablemente gracias a una innovación clave: un intercambiador de calor por contracorriente, denominado plexo arterial del húmero, que les permitía mantener constante la temperatura corporal en aguas frías. A medida que los pingüinos se fueron dispersando, su evolución hizo que desarrollasen una gran variedad de tamaños y formas, superior a la que se observa en los pingüinos modernos. Este árbol evolutivo indica el parentesco entre varias especies de pingüinos.



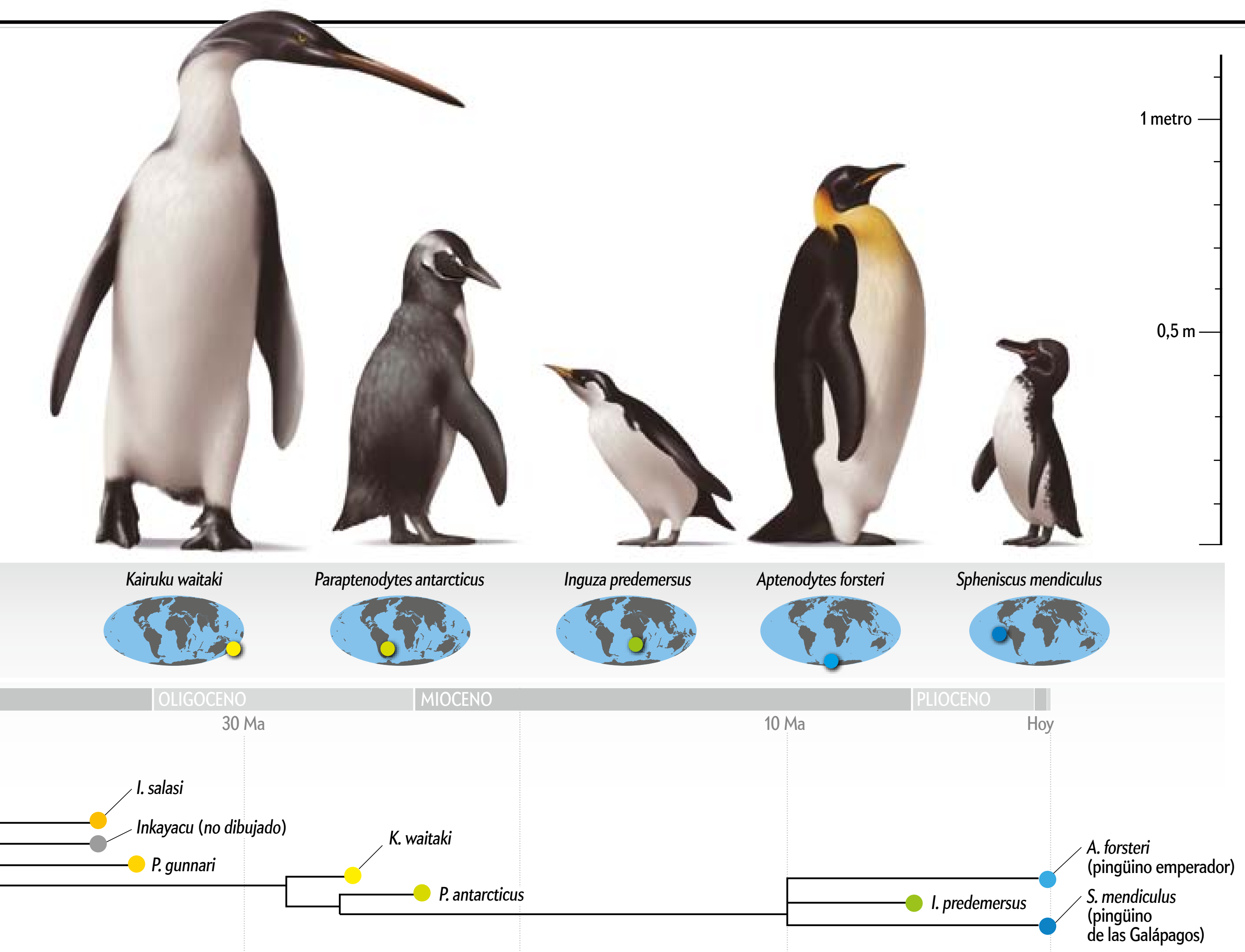
cen a un nuevo género, al que hemos denominado *Kairuku*, que en maorí significa «el buzo que regresa con comida». La conservación de todos los huesos clave del esqueleto nos ha permitido reconstruir el tamaño y las proporciones del cuerpo. Los emperadores actuales serían unos enanos en comparación con los pingüinos del género *Kairuku*, con una altura de 130 centímetros y al menos 60 kilogramos de peso.

Creemos que el tamaño de esos antiguos pingüinos de Nueva Zelanda fue una adaptación a la natación de larga distancia, desde las colonias de cría situadas en las islas bajas de Zelandia hasta el límite de la plataforma continental. Un tamaño mayor les habría permitido un buceo más eficaz en aguas profundas, a la busca de peces y calamares, pues las aves más voluminosas pueden nadar a mayor velocidad, almacenan mayor cantidad de oxígeno para realizar buceos más profundos y conservan el calor corporal de forma más eficiente. Cabe suponer que los pingüinos fósiles de la isla de Seymour, al ser más grandes, podían nadar a distancias superiores y alimentarse a mayor profundidad que las especies de menor tamaño, que se alimentarían más cerca de la costa.

UN FUTURO INCIERTO

Como custodios de la fauna aviar actual, podemos extraer del registro fósil de los pingüinos varias lecciones sobre su conservación. La mayor parte de las extinciones de pingüinos que se han producido durante los últimos 60 millones de años sucedieron mucho antes de la aparición de los humanos. Sin embargo, *Homo sapiens* no es totalmente inocente. Al menos una especie de pingüinos, *Megadyptes waitaha*, pariente del pingüino ojigualdo, parece haberse extinguido a causa, al menos en parte, de la caza. Si bien actualmente rara vez se les caza de forma deliberada, los pingüinos permanecen bajo la amenaza de distintas fuerzas locales y globales, como la sobrepesca, las mareas negras y la introducción de depredadores. Pero quizá sea todavía más turbadora a largo plazo la amenaza planteada por el cambio climático.

Los pingüinos se adaptaron muy bien a grandes cambios climáticos anteriores. Han proliferado tanto en tórridas zonas ecuatoriales durante las fases cálidas de invernadero como en los eriales congelados de la Antártida actual. Podríamos considerar equivocadamente que el éxito demostrado por los pingüinos durante 60 millones de años a la hora de adaptarse a los vaivenes del clima indica una gran tolerancia a cualquier cambio futuro que el calentamiento global pueda provocar. Sería un grave error. El tempo es fundamental para adaptarse a un cambio climático. Los paleontólogos han hallado pruebas de cambios graduales en las áreas de distribución de muchas especies durante las principales fluctuaciones climáticas de la prehistoria, como



ILUSTRACIONES DE STEPHANIE ABRAMOWICZ, MAPAS REALIZADOS POR XNR PRODUCTIONS

los que siguieron al avance y retroceso de los glaciares durante los últimos cientos de miles de años de ciclos glaciares.

Algunas especies reaccionan muy lentamente, lo que está bien cuando el clima se calienta unos pocos grados en el plazo de unos millones de años. Pero si la temperatura asciende varios grados en tan solo unas décadas, tal como muchos modelos señalan que podría suceder, las especies no tendrían tiempo de desplazarse hasta hábitats adecuados. O quizá no existirían hábitats adecuados a los que desplazarse.

Pensemos en el pingüino de las Galápagos. Esta pequeña ave generalmente prolifera bajo el sol ecuatorial, pero su población se ve diezmada cuando el fenómeno de El Niño resulta muy intenso; entonces, las corrientes del Pacífico se ven alteradas y las aguas frías y ricas en nutrientes que normalmente rodean las islas son reemplazadas por aguas cálidas pobres en nutrientes. Como estos pingüinos no se alejan mucho de las islas donde viven, no tendrán a dónde ir si el calentamiento vuelve las Galápagos demasiado cálidas para que críen a sus polluelos o consigan alimento.

Los pingüinos emperador se enfrentan a un problema distinto. Estas aves pueden no pisar tierra firme durante toda su vida, pues crían sobre gruesas placas de hielo marino. Si el hielo flotante se funde demasiado pronto en el transcurso del año, las colonias seguramente se destruirán. La fidelidad de los pingüinos a sus colonias incrementa aún más el peligro: muchos ejemplares regresan exactamente a la misma localidad a criar, año tras año. La solución que parece más sencilla, buscar otra placa de hielo para criar, no resulta viable debido a este comportamiento reproductivo tan arraigado.

Como paleontólogos, somos cada vez más conscientes de la fragilidad de los pingüinos modernos. Actualmente hay menos especies de pingüinos, son menos diversos morfológicamente y se hallan más limitados en su papel ecológico que hace millones de años. Aunque los biólogos los consideren especies típicamente modernas, en muchos aspectos son los supervivientes de una gran dinastía que ha producido algunos de los animales más interesantes que jamás hayan vivido en la tierra o en el mar. Sería una tragedia que estas criaturas extraordinarias desapareciesen ante nuestros ojos.

PARA SABER MÁS

Penguin heat-retention structures evolved in a greenhouse earth. Daniel B. Thomas, Daniel T. Ksepka y R. Ewan Fordyce en *Biology Letters*, vol. 7, n.º 3, págs. 461-464; 23 de junio, 2011.
New fossil penguins (aves, sphenisciformes) from the oligocene of New Zealand reveal the skeletal plan of stem penguins. Daniel T. Ksepka et al. en *Journal of Vertebrate Paleontology*, vol. 32, n.º 2, págs. 235-254, marzo de 2012.
March of the fossil penguins (blog): **fossilpenguins.wordpress.com**

Wolfgang Steinicke, físico de profesión y escritor, se considera, desde hace 40 años, astrónomo aficionado. Está especializado en historia de la astronomía, particularmente en los descubrimientos de nebulosas y cúmulos estelares durante el siglo XIX, así como en las observaciones del espacio profundo. Dirige el grupo de expertos en historia de la astronomía de la Asociación de Amigos de las Estrellas, en Alemania, y es miembro de la Real Sociedad Astronómica británica.



Stefan Binnewies, internista y neumólogo, se dedica al ejercicio privado de la medicina. Desde hace 30 años se interesa por la astronomía como aficionado, y sus especialidades son la astrofotografía y las excursiones nocturnas. Ha colaborado en numerosas publicaciones sobre astronomía.



HISTORIA DE LA ASTRONOMÍA

La carrera por el mayor refractor del mundo

En el siglo XIX se entabló una competición por el mayor telescopio refractor del mundo. A pesar de existir razones científicas de peso para construir potentes telescopios, en muchas ocasiones se trataba de una cuestión de prestigio patrio. A veces, unos milímetros otorgaban el récord de la gloria nacional

Wolfgang Steinicke y Stefan Binnewies

Se trata de aparatos que pertenecieron a un período crucial de la historia de la astronomía, la de los grandes telescopios refractores. Hoy, la mayoría no son más que piezas de museo, pero durante el siglo XIX formaron parte del equipamiento estándar de cualquier observatorio astronómico de prestigio. En un principio, se idearon para realizar observaciones visuales; andando el tiempo, se utilizaron también con fines fotográficos y espectroscópicos.

Un gran refractor cumplía, además, otra función: entrañaba gloria y honor. Por esa razón se mantuvo viva una incansable carrera entre naciones, observatorios y patrocinadores por contar con el mayor telescopio refractor del mundo. Y al igual que en las competiciones deportivas, escasos milímetros adjudicaban con frecuencia la victoria. Algunos plusmarquistas caían pronto en el olvido.

Los constructores trabajaban al límite de las posibilidades técnicas y, en parte, las rebasaban. Algunos ejemplares se asemejaron más a un cañón que a un telescopio. Su longitud y el enorme peso conjunto de objetivo, tubo óptico y montura requerían el levantamiento de cúpulas inmensas. El breve resumen histórico que vamos a relatar narra sus éxitos, sin olvidar fracasos y catástrofes. La fecha de arranque es 1824, año en que Joseph von Fraunhofer sienta las nuevas bases de la construcción de telescopios.

PRECISIÓN FRENTE A ABERTURA

A finales de 1824, Wilhelm Struve, director del Observatorio Astronómico de Dorpat (la actual Tartu, Estonia), recibió desde Alemania 22 cajas pesadas que contenían la obra maestra de Fraunhofer: un telescopio refractor de 24,4 centímetros con

STEFAN BINNEWIES/*STERNE UND WELTRAUM*

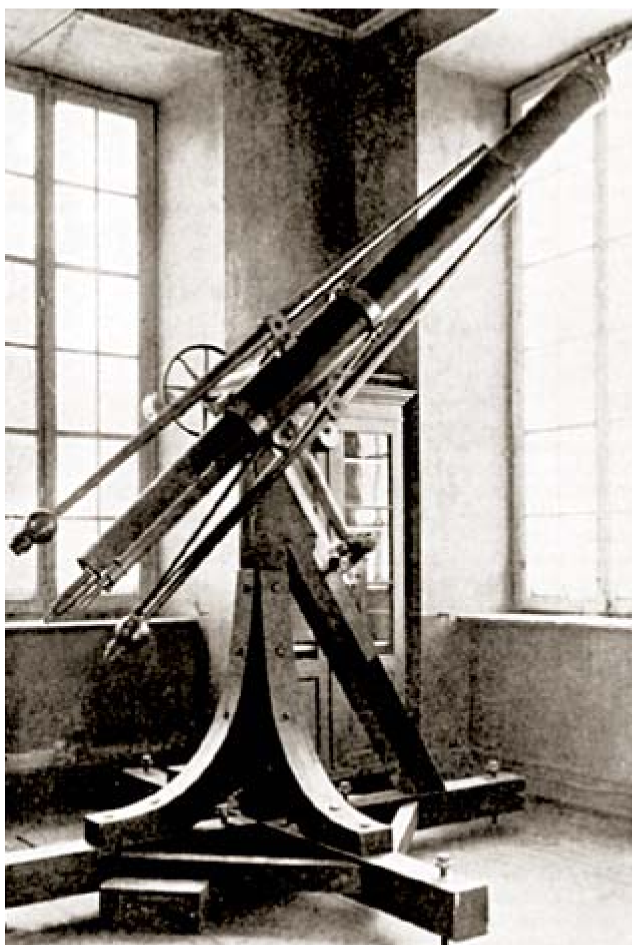
EN SÍNTESIS

Tras perfeccionarse la fabricación de lentes y objetivos durante la primera mitad del siglo XIX, comenzó una carrera por conseguir el mayor refractor del mundo.

Tanto observatorios de financiación gubernamental en Europa y Estados Unidos como patrocinadores privados y astrónomos aficionados contribuían a la construcción de telescopios cada vez mayores.



1. El refractor de 27 pulgadas construido por Grubb e instalado en el Observatorio de la Universidad de Viena arrebató a Estados Unidos el título de mayor telescopio del mundo, galardón que recuperó para Europa.



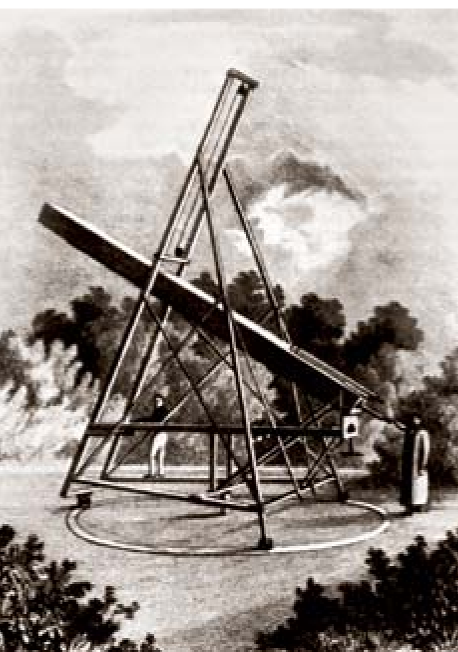
2. El refractor de Dorpat construido por Joseph von Fraunhofer es hoy una pieza de museo.

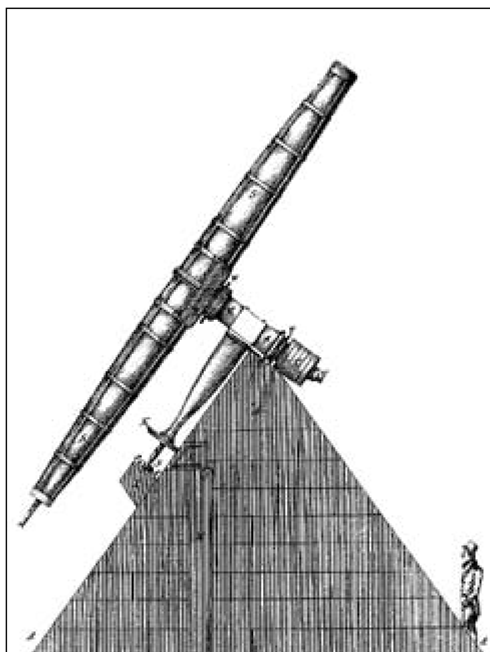
una distancia focal de 4,1 metros, el mayor del mundo. Struve ensambló cuidadosamente las piezas, y el instrumento, imponente, entró en funcionamiento en Nochebuena; era un tubo de madera noble de caoba sobre una montura provista de un mecanismo de relojería, acompañado de un trípode de madera (*figura 2*). Su colega John Herschel, inglés, lo describió como «probablemente, el mejor telescopio refractor que se haya construido jamás».

Poco después, Struve iniciaba un catálogo de estrellas binarias. En 1827 apareció su primera versión. Entre 1835 y 1838, aprovechó la precisión de su nuevo aparato para determinar la paralaje de la estrella Vega. Sin embargo, el valor obtenido no era del todo exacto. Algo más tarde, Friedrich Wilhelm Bessel —que contaba también con un refractor procedente del taller de Fraunhofer— calculó un valor fidedigno de la paralaje de la estrella 61 Cygni. A Bessel se le reconoció la prioridad en la determinación de la distancia de una estrella.

Tras la construcción del refractor de Dorpat, el Observatorio de Múnich le encargó a Fraunhofer un aparato con un objetivo de 35,6 centímetros de diámetro. Pero Fraunhofer murió en 1826. Su sucesor, Georg Merz, solo pudo suministrar un refractor de 28,5 centímetros, que se instalaría en Bogenhausen en 1835. Ese mismo año, el Observatorio de Berlín obtenía una réplica del refractor de Dorpat; con él, Gottfried Galle y Heinrich d'Arrest descubrirían el planeta Neptuno el 23 de septiembre de 1846. El histórico instrumento se exhibe hoy en el Deutsches Museum de Múnich. El refractor de Merz, de 28,5 centímetros, se conserva en Bogenhausen. Por su parte, el «Fraunhofer» de Struve se restauró en Tartu en 1993 y puede visitarse en el antiguo observatorio.

Mientras tanto, un ejemplar único en el castillo irlandés de Markree se hacía con el título de mayor telescopio refractor del mundo. En 1831, Eward Cooper, propietario del castillo y apasionado astrónomo aficionado, había recibido de manos del ingeniero óptico parisiense Robert-Aglae Cauchoix un objetivo de







ARCHIVO DE WOLFGANG STEINICKE/*STERNE UND WELTRAUM*

3. Tres caras del refractor de Markree: con montura de madera construida por Herschel (*izquierda*), con montura ecuatorial sobre un enorme pedestal de piedra (*centro*) y con su nuevo aspecto en Hong Kong (*derecha*).

Refractores más importantes ordenados según el año de su puesta en funcionamiento								
Ubicación	Observatorio/Instrumento	País	Año	Fabricante	Diámetro D (centímetros)	Distancia focal ƒ (metros)	ƒ/D	Altura (metros)
Dorpat	Observatorio de Dorpat	EE	1824*	Fraunhofer	24,4	4,1	16,8	67
Castillo Markree	Obs. privado de Cooper	IE	1831*	Cauchoix/Grubb	35,5	7,6	21,5	45
Berlín	Observatorio de Berlín	DE	1835	Merz	24,4	4,3	17,6	47
Múnich	Observatorio Bogenhausen	DE	1835	Merz	28,5	4,9	17,2	500
San Petersburgo	Observatorio de Púlkovo	RU	1839*	Merz & Mahler	38,0	6,9	18,2	75
Cincinnati	Observatorio Universitario	EE.UU.	1845	Merz & Mahler	30,5	5,3	17,4	247
Cambridge	Observatorio de Harvard	EE.UU.	1847*	Merz & Söhne	38,1	6,8	17,9	24
Wandsworth	Refractor de Craig	GB	1852*	Chance/Gravatt	61,0	23,2	38,0	10
París	Refractor de Porro	R	1856	Porro	52,0	15,0	28,8	60
Walworth	Refractor de Buckingham	GB	1862	Buckingham/Wray	54,0	8,7	16,1	10
Chicago	Observatorio de Dearborn	EE.UU.	1863	Clark	47,0	8,2	17,4	175
Dunsink	South Equatorial	IE	1868	Cauchoix/Grubb	29,8	5,8	19,5	91
Gateshead	Obs. privado de Newall	GB	1868*	Cooke	62,5	9,1	14,6	20
Bothkamp	Obs. privado de Bülow	DE	1870	Schröder	29,3	4,9	16,7	32
Washington	Observatorio Naval EE.UU.	EE.UU.	1873*	Clark	65,5	9,9	15,1	38
Potsdam	Observatorio Astrofísico	DE	1878	Schröder	29,8	5,2	17,4	100
Dresde	Obs. privado de Engelhardt	DE	1879	Grubb	30,6	3,9	12,6	124
Estrasburgo	Observatorio Universitario	DE (FR)	1880	Merz & Söhne/Repsold	48,7	6,9	14,2	144
Princeton	Observatorio Halsted	EE.UU.	1882	Clark	58,0	9,8	16,9	75
Viena	Observatorio Universitario	AT	1883*	Grubb	68,6	10,5	15,3	240
San Petersburgo	Observatorio de Púlkovo	RU	1884*	Clark/Repsold	76,2	13,7	18,0	75
Charlottesville	Obs. Leander McCormick	EE.UU.	1885	Clark	66,8	9,9	14,9	259
Niza (Monte Gros)	Observatorio Bischoffsheim	FR	1887*	Henry/Gautier	76,9	17,9	23,3	376
Mt. Hamilton	Observatorio Lick	EE.UU.	1888*	Clark	91,4	17,4	19,0	1283
Meudon	Obs. de París-Meudon	FR	1891	Henry/Gautier	83,0	16,2	19,5	162
Greenwich	Real Observatorio	GB	1893	Grubb	71,1	8,5	12,0	47
Berlín-Treptow	Observatorio Archenhold	DE	1896	Steinheil/Hoppe	68,0	21,0	30,9	41
William Bay	Observatorio Yerkes	EE.UU.	1897*	Clark/Warner & Swasey	102,0	19,4	19,0	334
Potsdam	Observatorio Astrofísico	DE	1899	Steinheil/Repsold	80,0	12,2	15,3	95
París	Telescopio de la Exposición Universal	FR	1900*	Mantois/Gautier	125,0	57,0	45,6	65
Hamburgo	Obs. Hamburgo-Bergedorf	DE	1912	Steinheil/Repsold	60,0	9,0	15,0	50
Pittsburgh	Observatorio de Allegheny	EE.UU.	1914	Brashear	76,2	14,4	18,9	370
Potsdam	Obs. Potsdam-Babelsberg	DE	1915	Zeiss	65,0	10,1	15,5	35
Johannesburgo	Observatorio de Yale	ZA	1925	Grubb	66,0	10,6	16,1	1760
Llano del Hato	Obs. Astronómico Nacional	VE	1972	Zeiss	65,0	10,5	16,2	3600
Hida	Observatorio de Hida	JP	1972	Zeiss	65,0	10,5	16,2	1275
La Palma	Telescopio Solar Sueco/SST	SE (ES)	2002	Svenska Bearing	97,0	20,6	21,2	2400

*Nuevo récord de abertura

35,5 centímetros con una distancia focal de 7,6 metros. El refractor de Cooper y el instrumento de Fraunhofer y Merz eran mundos aparte. Inicialmente, el telescopio constaba de un tubo de madera sobre una montura acimutal fabricada por Herschel. Tres años después, el ingeniero óptico y constructor de telescopios irlandés Thomas Grubb dotó al instrumento de un tubo de hierro y lo colocó sobre una montura ecuatorial, que se apoyaba sobre una pirámide de piedra de cuatro metros de altura (*figura 3*).

El refractor no se alojaba en una cúpula, sino que estaba protegido del viento y la lluvia por un muro circular de cuatro metros de altura. La hazaña de Cooper consistió en elaborar el «catálogo de Markree», elenco que contiene más de 60.000 estrellas a lo largo de la eclíptica y que se publicó entre 1851 y 1856 en cuatro tomos. El correspondiente atlas, inédito, se conserva en Cambridge, Inglaterra.

El destino final del refractor de Markree resultó tan errático como su aspecto. Tras años de deterioro, fue trasladado a Hong Kong en 1902, donde quedó arrumbado. En 1941, el telescopio sufrió graves daños a consecuencia de un bombardeo. Sin embargo, su objetivo continuó utilizándose hasta 1989 en el espectrógrafo de Littrow del Observatorio de Manila.

RIVALES TRANSATLÁNTICOS

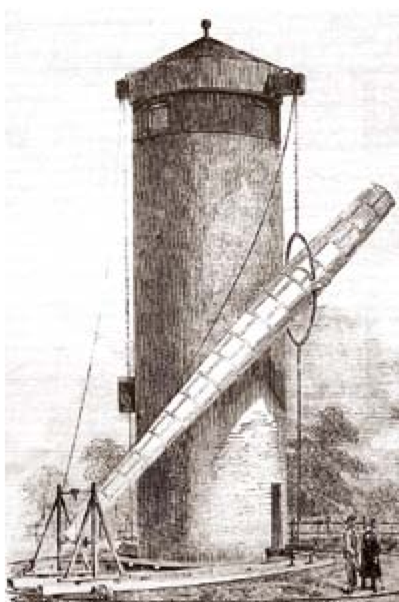
La compañía Merz, reforzada por Joseph Mahler, lanzó su contraataque en 1839. Por encargo del zar Nicolás I, Wilhelm Struve, de Dorpat, comenzó a planificar la fundación de un observatorio nacional ruso en Púlkovo, cerca de San Petersburgo. Para ello, Merz & Mahler suministró un refractor con una abertura de 38 centímetros y una distancia focal de 6,9 metros (*figura 4*). El observatorio se inauguró en agosto de 1839 y Struve fue su primer director. El principal objetivo del centro sería la observación de estrellas binarias, labor en la que destacó especialmente Otto Struve, que asumió la dirección de Púlkovo en 1862, a los dos años de la muerte de su padre.



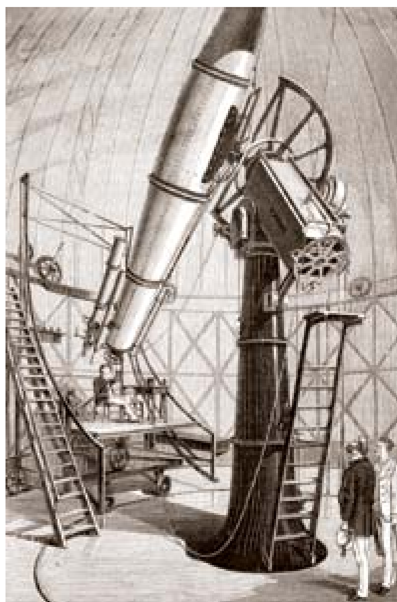
4. En 1839, un refractor de 38 centímetros fabricado en Múnich por Merz & Mahler se convirtió en el instrumento principal del Observatorio Nacional de Púlkovo, en Rusia.



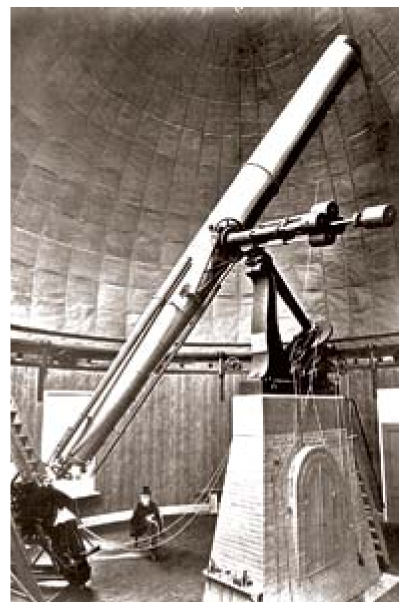
5. Con la adquisición de una réplica del refractor de Púlkovo, los astrónomos del Observatorio de la Universidad Harvard pretendían retomar el éxito de los europeos.



6. En 1852, John Craig encargó construir cerca de Londres un telescopio monumental con un objetivo de 61 centímetros cuya montura sería una torre.



7. El refractor de 25 pulgadas de Robert Newall se instaló en Gateshead (Inglaterra) en 1868. Desde 1960, el telescopio se conserva en Penteli, Grecia.



8. En 1877, Asaph Hall descubrió los dos satélites de Marte a través del refractor de 26 pulgadas del Observatorio Naval de Estados Unidos en Washington.

ARCHIVO DE WOLFGANG STEINICKE/*STERNE UND WELTRAUM*

El refractor ruso incitó la aparición de un nuevo competidor: Estados Unidos. Los astrónomos del Nuevo Mundo querían enfrentarse finalmente a la supremacía europea en astronomía. Una de las primeras respuestas fue la instalación de un refractor de 30,5 centímetros de la compañía Merz & Mahler en Cincinnati, en 1845. El siguiente reto sería superar a Púlkovo. William Bond, director del Observatorio de la Universidad Harvard en Cambridge, Massachusetts, encargó a la compañía muniquesa Merz & Söhne un refractor con una abertura de 38,1 centímetros: ¡un milímetro superior al de Dorpat! El instrumento, que todavía se conserva en Harvard, se utilizó en la observación de cometas, planetas, estrellas y nebulosas (*figura 5*). William Bond y su hijo George alcanzaron la fama por el descubrimiento de Hiperión, el satélite de Saturno. Los dibujos

del cometa Donati en 1858, así como los de las nebulosas de Orión y Andrómeda, también suscitaron un gran interés.

En agosto de 1852, John Craig estableció un nuevo récord en Wandsworth, cerca de Londres. Aumentó la abertura en un 60 por ciento respecto a Púlkovo y Harvard. Robert Chance, fabricante de vidrio de Birmingham, construyó un objetivo de 61 centímetros. El tubo metálico en forma de cigarro y la inusitada montura constituida por una torre de ladrillo fueron obra del ingeniero William Gravatt (*figura 6*). Por problemas mecánicos y unas lentes corregidas defectuosas, el refractor se desmontó en 1856.

Doce años más tarde, Robert Newall, ingeniero y astrónomo escocés, superó con holgura el refractor de Craig al alcanzar un nuevo récord en Gateshead, en los aledaños de Newcastle, en 1868 (*figura 7*). La montura ecuatorial, construida por Thomas Cooke & Sons en York, sujetaba un objetivo de 62,5 centímetros con una distancia focal de 9,1 metros. El instrumento, harto complejo y de nueve toneladas, se apoyaba sobre una columna de 5,8 metros. Debido a una intensa contaminación atmosférica y un miserable tiempo meteorológico, Newall solo consiguió realizar algunas observaciones. En 1891, el telescopio de 25 pulgadas se trasladó a Cambridge, donde se empleó en la observación de estrellas binarias hasta que en el decenio de los cincuenta se declaró inservible. El refractor de Newall fue entonces enviado al Observatorio de Atenas. Desde 1960 se conserva en Penteli, al noreste de la ciudad. Convertido en 1995 en pieza de museo, el viejo instrumento despierta la curiosidad de numerosos visitantes.

A comienzos de 1893, los británicos se hicieron con un refractor más grande: el telescopio del Real Observatorio de Greenwich, construido por Grubb, con una abertura de 71,7 centímetros y una distancia focal de 8,5 metros. Presentaba una peculiar montura inglesa acuñada y estaba alojado en una cúpula en forma de cebolla, que en 1944 fue dañada por una bomba V1 alemana. Más tarde, el refractor de 28 pulgadas se trasladó al castillo de Herstmonceux, que posteriormente sería la sede del Real Observatorio de Greenwich. En 1971, se transfirió junto con el resto del equipamiento hasta Greenwich, donde hoy constituye una de las atracciones principales del Real Observatorio.

Mientras tanto, el gran refractor de Merz & Mahler había llegado al Observatorio de la Universidad de Harvard, en Estados Unidos. Los norteamericanos pretendían con ahínco alzarse de nuevo con el récord; para ello contaban con un magnífico constructor de



9. Gigante pero esbelto: El refractor de 76,9 centímetros del Observatorio de Niza, con una distancia focal de 17,9 metros. Los hermanos Henry fabricaron el material óptico.



10. El refractor de 36 pulgadas del Observatorio Lick se construyó con financiación privada. A comienzos de 1888, doce años después del fallecimiento de su fundador, James Lick, se concluyó el Observatorio del monte Hamilton, en California.

STEFAN BINNEWIES/*STERNE UND WELTRAUM*





11. El refractor de Yerkes todavía ostenta el récord mundial con una abertura de 1,02 metros y una distancia focal de 19,8 metros. La parte móvil pesa en total 20 toneladas.

telescopios: Alvan Clark. Su compañía en Cambridgeport, Massachusetts, dominaría el mercado durante lo que quedaba de siglo.

En 1873, Clark concedió el nuevo título al Observatorio Naval de Estados Unidos, en Washington: un refractor con un objetivo de 65,5 centímetros y una distancia focal de 9,9 metros (*figura 8*). Cuatro años más tarde, el instrumento saltó a las primeras páginas de los periódicos cuando Asaph Hall descubrió, a través del mismo, Fobos y Deimos, los satélites de Marte. Ese extraordinario telescopio se utilizó, en especial, para determinar la posición de planetas, satélites y estrellas binarias. El aparato todavía se conserva intacto.

El descubrimiento no solo despertó la envidia de los europeos, sino que mantuvo, además, viva la carrera en Estados Unidos, lo que derivó en la construcción de un nuevo refractor a manos de Clark, que superaría en 1,3 centímetros el refractor de 26 pulgadas del Observatorio Naval de Estados Unidos. En 1870, el industrial de Chicago Leander McCormick decidió erigir el mayor refractor del mundo. Pero hubo que esperar algunos años antes de poder instalar un observatorio para la Universidad de Virginia en Charlottesville. La construcción se retrasó debido a problemas diversos y, antes de llegar a concluirse, ya se ponía en funcionamiento un refractor de 58 centímetros en el Observatorio Halsted, en Princeton. Sin embargo, no era suficiente. Cuando el instrumento de McCormick vio por fin la luz en abril de 1885 sobre el monte Jefferson, a 260 metros de altura, ya operaban en Viena y Púlkovo dos refractores más grandes.

EL TRIATLÓN EUROPEO

En 1883, Viena consiguió que Europa recuperara el récord del mayor refractor del mundo con un telescopio de 27 pulgadas, construido por Grubb, con una distancia focal de 10,5 metros. Desde entonces, el refractor de 68,6 centímetros sobresale de una cúpula de 14 metros en el majestuoso edificio del observatorio de la Universidad, ubicado en Türkenschanze (*figura 1*). Sin embargo, la alegría vienesa duró solo un año y medio; surgió un nuevo líder. Otto Struve había encomendado a Alvan Clark & Sons la construcción de un imponente refractor de 76,2 centímetros y distancia focal de 13,7 metros para el Observatorio de Púlkovo.

El aparato se alojaba en una estructura protectora cilíndrica y se inauguró en 1884. La montura era obra de la compañía Repsold, de Hamburgo. El antiguo «Merz» fue retirado y vendido (sin objetivo). El telescopio se conservó luego en el Deutsches Museum de Múnich hasta que a finales de 1944 fue destrozado por un bombardero aliado. El Observatorio de Púlkovo co-

12. El refractor doble de mayores dimensiones se halla en Meudon, en los alrededores de París. Ambos telescopios se alojan superpuestos en un tubo ortoédrico.

rrió peor suerte: fue devastado entre 1942 y 1943 por las fuerzas alemanas durante el sitio de Leningrado.

En 1887, un nuevo emplazamiento dio de qué hablar: el monte Gros, cerca de Niza, de 360 metros de altura. El observatorio era un regalo del industrial Raphaël Bischoffsheim. También el magnate soñaba con el mayor refractor del mundo. Y en esta ocasión, el proyecto se materializó: con un objetivo de 76,9 centímetros, el telescopio de los hermanos Paul y Prosper Henry superaba a Púlkovo en 7 milímetros (*figura 9*). Niza se puso a la cabeza con una distancia focal de 17,9 metros. La cúpula diseñada por Gustave Eiffel, de 26 metros de diámetro y 95 toneladas de peso, superaba las dimensiones de cualquier otra construcción precedente. No reposaba sobre rodillos, como era lo habitual, sino que flotaba sobre una cubeta anular. El instrumento y el edificio neoclásico se renovaron posteriormente; la cúpula flotante terminó por instalarse sobre rodillos.

MONUMENTOS PARA LA ETERNIDAD

Mientras el listón europeo permanecía en los 76,9 centímetros, los estadounidenses preparaban su contraataque final. De nuevo, la intervención de mecenas con poder financiero desempeñó un papel fundamental. Por aquel entonces se encontraba en auge la moda de construir grandes telescopios a modo de monumentos. Por ello, James Lick, un terrateniente acaudalado, donó casi toda su fortuna para erigir el refractor más grande del mundo en la montaña más alta posible. Sin embargo, cuando falleció en 1876 todavía faltaban doce años para que el ambicioso proyecto se hiciera realidad. Al concluir, el refractor de 91,4 centímetros se erguía en el monte Hamilton, de 1283 metros de altura, en San José, California (*figura 10*).

El Observatorio Lick fue el primer observatorio astronómico propiamente dicho. El refractor de 36 pulgadas con distancia focal de 17,4 metros se instaló en una cúpula de 18,3 metros. La columna de 10 metros de altura que soportaba la compleja montura alemana hacía las veces de túmulo funerario. En el pedestal se lee: «Aquí descansa el cuerpo de James Lick».



13. La respuesta alemana ante Meudon: el «gran refractor» de Potsdam. Se construyó en 1899 y se renovó completamente en 2005.

Dado su emplazamiento, donde el aire es transparente y permanece en calma durante casi 300 noches al año, se auguraban resultados espectaculares. Efectivamente, Edward E. Barnard descubrió en 1892 la quinta luna de Júpiter (Amaltea). Junto a Sherbourne W. Burnham observó planetas, estrellas binarias y nebulosas. Por desgracia, los científicos tuvieron un duro enfrentamiento con el director, Edward Holden. A raíz de ello Burnham y Barnard abandonaron, muy a su pesar, el Observatorio Lick. Pero ya tenían un nuevo destino: Williams Bay en Wisconsin, a 140 kilómetros al noroeste de Chicago. La ubicación no era óptima, pero aparentemente se trataba del lugar idóneo para levantar un nuevo monumento, en esta ocasión en honor de Charles Yerkes. El adinerado transportista se había propuesto superar a Lick. La obra fue mérito de George Ellery Hale, quien, con el dinero que Yerkes había cedido a la Universidad de Chicago, pudo construir un observatorio monumental.

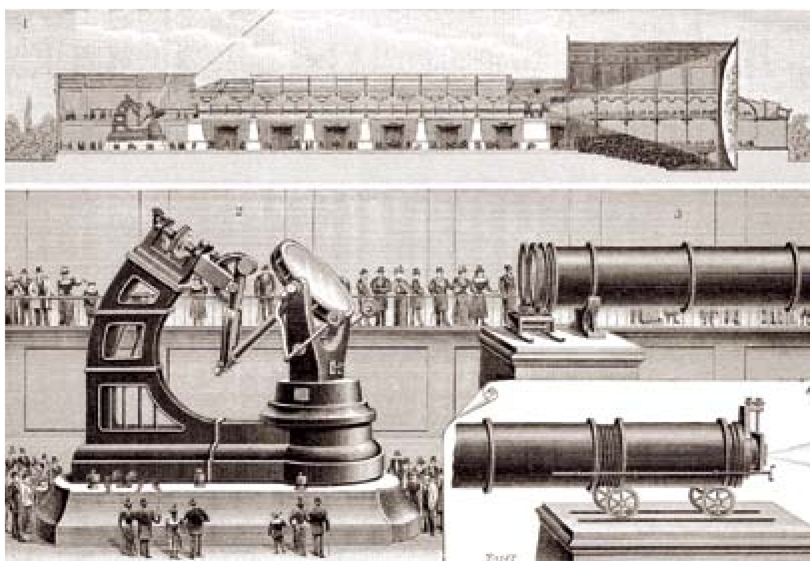
En 1893, el telescopio —todavía sin objetivo— se presentó en la Exposición Universal de Chicago. Dos años más tarde, Alvan Clark & Sons suministraría el objetivo, cuyo diámetro rebasaba por primera vez el límite de un metro y pesaba 500 kilos. La ficha técnica del aparato es impresionante: 102 centímetros de abertura, 19,8 metros de distancia focal y una parte móvil de 20 toneladas de peso (*figura 11*).

Le faltó fortuna inicial al refractor de Yerkes. Poco después de la inauguración en 1897, se rompió un cable de anclaje de la plataforma de observación y esta se derrumbó estrepitosamente. Por suerte, nadie resultó herido. En 1933, el nuevo refractor de 40 pulgadas causó furor: la luz de la estrella Arturo incidía en una fotocélula y se transformaba en la corriente eléctrica que encendió la iluminación del acto inaugural de la Exposición Universal de Chicago. No obstante, a finales de siglo, el monstruoso refractor de Yerkes ya se había convertido en un modelo fuera de producción. Tanto su construcción como su emplazamiento, a una altura irrelevante de 334 metros, se habían quedado obsoletos. La astrofísica moderna exigía la instalación de reflectores luminosos en altas montañas. Hale los suministraba. Fundó consecutivamente el Observatorio del monte Wilson, que contaba con un espejo de 2,5 metros (financiado por John Hooker y operativo aún desde 1917) y el Observatorio del monte Palomar

RAINER SPARENBERG/*STERNE UND WELTRAUM*



14. Con una distancia focal de 21 metros, el refractor más largo del mundo: el «cañón» del Observatorio Archenhold en el barrio berlinés de Treptow.



15. Tan solo apto para admirarlo, pero no para mirar a través del mismo: el refractor horizontal de 1,25 metros de abertura, en la Exposición Universal de París de 1900.

con el legendario reflector de cinco metros; entró este en funcionamiento en 1948 y se le bautizó con el nombre de Hale.

Con un diámetro de casi un metro, el refractor de Yerkes había alcanzado el límite superior de los refractores. Aun así, iban a alcanzarse nuevos récords mediante la construcción de otros instrumentos singulares. Cabe mencionar principalmente el refractor doble, compuesto por dos objetivos corregidos, uno visual y otro fotográfico, que presentan aberturas distintas pero distancias focales similares. El tubo de la parte visual servía de guía durante las observaciones. En 1891, los hermanos Henry y el fabricante de instrumentos astronómicos Paul Gautier construyeron el que sería el referente de dicho género: el telescopio de Meudon, cerca de París. Sus objetivos presentan diámetros de 83 centímetros (visual) y 62 centímetros (fotográfico), y sus respectivas distancias focales son de 16,2 y 15,9 metros. Los telescopios, instalados dentro de un tubo ortoédrico, se apoyan sobre una montura alemana (*figura 12*).

En 1899 se inauguró un refractor doble similar en el Observatorio Astrofísico de Potsdam. El káiser Guillermo II acudió personalmente a la inauguración. Los datos técnicos resultan asombrosos: los diámetros de los objetivos son de 80 centímetros (fotográfico) y 50 centímetros (visual) y ambos tienen una distancia focal de 12,2 metros (*figura 13*). La óptica fue fabricada por Steinheil y la montura alemana por Repsold. Desde 2005, el «gran refractor» se encuentra en proceso de renovación.

Por desgracia, aquel imponente instrumento, pintado de verde oscuro, no cumplió las expectativas de los astrofísicos. En numerosas ocasiones fue necesario volver a tallar ambos objetivos. Otro problema radicaba en su ubicación sobre la colina Telegrafenberg, de tan solo 96 metros de altura. La contaminación lumínica y atmosférica imposibilitaban a menudo las observaciones. El Observatorio de Meudon, a solo 10 kilómetros al sudoeste de París y construido a una altura de 165 metros, se enfrentó a los mismos problemas.

El refractor de Potsdam es el mayor telescopio refractor de Alemania. Otro telescopio único de equiparables dimensiones es el «cañón» que todavía se exhibe en el barrio berlinés de Treptow, con 21 metros de distancia focal (*figura 14*). El refractor sin cúpula, con una abertura de 68 centímetros, constituyó la principal atracción de la Exposición Industrial de Berlín de 1897. En la actualidad, el complejo instrumento, de 160 toneladas de peso y fabricado por Steinheil y Hoppe, forma parte del Observatorio Archenhold.

STEFAN BINNEWIES (*arriba*); ARCHIVO DE WOLFGANG STEINICKE (*abajo*)/*STERNE UND WELTRAUM*



16. El segundo mayor telescopio del mundo: el Telescopio Solar Sueco de 20 metros de altura, instalado en la isla de La Palma.

RAINER SPARENBERG/*STERNE UND WELTRAUM*

LOS REZAGADOS DEL SIGLO XX

La Exposición Universal de París de 1900 aportó un peculiar grano de arena a la fama de la Grande Nation; a saber, un telescopio que eclipsaría el resto. Pero debido a su mala ubicación, que hacía del plan una hazaña arriesgada, y a sus grandes dimensiones, el proyecto resultó ser efímera flor de un día, sin utilidad científica alguna (*figura 15*). El objetivo de 1,25 metros de diámetro pesaba 1,8 toneladas. El objetivo del refractor de Yerkes se había deformado debido al peso y, en consecuencia, sus propiedades ópticas habían empeorado considerablemente y comenzaban a causar patentes molestias. Por ello, se decidió instalar en París un refractor horizontal orientado de norte a sur. Teniendo en cuenta su distancia focal de 57 metros, ¡no quedaba más remedio!

Para realizar las observaciones astronómicas, un espejo plano (celostato) de 2 metros de diámetro guiaba la luz estelar hacia un telescopio dispuesto horizontalmente. La parte donde se alojaba el ocular era de tales dimensiones, que se requería el uso de raíles para moverla. Las observaciones, difíciles, se reservaron para contadas ocasiones. El aumento mínimo de 500× restringía el campo visual a tres minutos de arco. La proyección de Marte sobre una pantalla de 400 metros cuadrados resultó un fracaso. Al concluir la exposición, ningún comprador se interesó por él, de modo que fue desmantelado. El objetivo y el espejo plano se transfirieron al Observatorio de París. Desde entonces, el refractor de Yerkes volvió a proclamarse número uno mundial.

Aunque los telescopios reflectores alcanzaron la supremacía, todavía se construyeron algunos telescopios refractores de grandes dimensiones a lo largo del siglo XX. En 1912, se instaló en el nuevo Observatorio de Hamburgo-Bergedorf un refractor de 60 centímetros construido por Steinheil/Repsold. Tras su renovación, el instrumento, de 10 metros de longitud, vuelve a gozar hoy de su antiguo esplendor.

En 1914, se instaló en el Observatorio Allegheny de Pittsburgh el refractor Thaw, construido por John Brashear. Presenta una abertura de 76,2 centímetros (idéntica a la de Púlkovo) y una distancia focal de 14,4 metros; todavía se emplea en astrometría. Los últimos grandes (y clásicos) refractores se pusieron en funcionamiento en 1972. Se instalaron en el Observatorio de Hida en Japón y en el Llano del Hato, en Venezuela. Se trata de aparatos estándar de la compañía Zeiss, con 65 centímetros de abertura y 10,5 metros de distancia focal. Una peculiaridad caracteriza al refractor venezolano: situado a 3600 metros de altura, es el refractor instalado a mayor altura del mundo.

Al Telescopio de Yale-Columbia (66 centímetros de abertura y 10,6 metros de distancia focal), construido por Grubb, la suerte le deparó un triste destino. Instalado en Johannesburgo en 1925 y posteriormente trasladado al Observatorio de Monte Stromlo, en Australia, un incendio forestal en enero de 2003 lo destruyó junto con otros cinco instrumentos.

En 1928, el refractor de Yerkes estuvo a punto de ser destronado. Con ocasión de la Exposición Universal de Púlkovo, Rusia había instalado en Simeis, en la península de Crimea, un refractor de 41 pulgadas construido por la compañía Grubb. Después de que se construyeran la montura y la cúpula (a cargo de los sucesores de Grubb-Parsons), los rusos devolvieron las piezas de vidrio, de 105 centímetros de diámetro, por considerarlas deficientes. El proyecto se canceló y Yerkes conservó su título.

En 2002 surgió un nuevo competidor del veterano refractor de Yerkes: el Telescopio Solar Sueco, instalado a 2400 metros de altura en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla canaria de La Palma (*figura 16*). Su objetivo, de 107 centímetros de diámetro, es mayor, pero la abertura utilizada no supera los 97 centímetros, aun así superior a la del refractor de Lick.

En cualquier caso, no se puede hablar de un renacimiento de los telescopios refractores. El futuro pertenece a los reflectores acimutales, como el propuesto Telescopio Europeo Extremadamente Grande, que estará dotado de un espejo de 39 metros y debería ser operativo a finales de este decenio. No obstante, los grandes refractores que quedan hoy en día, y que en parte continúan utilizándose con fines científicos, siguen despertando fascinación. Cerca de 40 instrumentos poseen aberturas de 50 centímetros o más amplias y siete de ellos superan los 70 centímetros. El visitante se halla ante impresionantes vestigios que pertenecieron a una etapa trascendental en la historia de la astronomía y puede convencerse de ello al visitar Potsdam, Treptow, Viena, Meudon, Niza o los Observatorios de Lick y Yerkes.

PARA SABER MÁS

Fernrohre und ihre Meister. R. Riekher. VEB Verlag Technik; Leipzig, 1957.
Die alte Sternwarte Tartu. P. Müürsepp en *Sterne und Weltraum*, págs. 129-131; junio de 1966.
Ein Fernrohr-Unikum. H. Oberndorfer en *Sterne und Weltraum* págs. 403-404, diciembre de 1978.
The history of the telescope. H. King. Dover Publications; Nueva York, 1979.
Der Refraktor der Sternwarte Pulkowa. G. Hartl en *Sterne und Weltraum*, págs. 397-404; julio-agosto de 1987.
Der wiedererstandene Große Refraktor. Neuer Glanz auf dem Potsdamer Telegrafenberg. E.-A. Gussmann y G. Kühn en *Sterne und Weltraum*, págs. 52-55, abril de 2008.
Sternwarten. 95 astronomische Observatorien in aller Welt. W. Steinicke y S. Binnewies. Oculum Verlag; Erlangen 2008.
Nebel und Sternhaufen. Geschichte ihrer Entdeckung, Beobachtung und Katalogisierung —von Herschel bis zu Dreyers «New general catalogue». W. Steinicke. Books on Demand; Norderstedt, 2009.

FÍSICA ATMOSFÉRICA

DUENDES, ELFOS Y CHORROS AZULES

Nuevos hallazgos sobre la microfísica de los eventos luminosos transitorios permiten ahondar en la comprensión de las tormentas eléctricas

Alejandro Luque y Francisco José Gordillo Vázquez

EN SÍNTESIS

Las tormentas no sólo producen descargas eléctricas entre las nubes y el suelo: también generan enormes descargas a decenas de kilómetros de altura. El estudio de estos espectaculares eventos transitorios luminosos (ETL) arroja luz sobre las descargas eléctricas en gases.

Por su carácter misterioso e inesperado, estos fenómenos atmosféricos reciben nombres tan llamativos como duendes, elfos y chorros. Distintos procesos físicos microscópicos explican sus variadas formas, tamaños y duración, así como la naturaleza de la luz que emiten.

A pesar de los enormes avances realizados en la comprensión de los ETL, quedan todavía algunos interrogantes por resolver: ¿cómo influyen en la composición atmosférica? ¿Qué efecto ejercen sobre las corrientes eléctricas que envuelven la Tierra? ¿Existen ETL en otros planetas?

Al mismo tiempo admirables y estremecedoras, las tormentas eléctricas constituyen sin duda uno de los mayores espectáculos de la naturaleza. Cada quince milésimas de segundo, un rayo cae sobre algún lugar de la Tierra, liberando una gran cantidad de energía que percibimos mediante el sonido del trueno y la luminosidad del relámpago. Sin embargo, aunque se trata del fenómeno eléctrico más familiar, no es el único. En las capas más altas de la atmósfera se desatan otras manifestaciones menos visibles que, debido a su fugacidad y a que suelen esconderse tras las nubes que las alimentan, no se descubrieron hasta hace apenas veinte años.

EL SUEÑO DE UNA NOCHE DE VERANO

En la noche del 5 al 6 de julio de 1989, un grupo de la Universidad de Minnesota dirigido por John R. Winckler ensayaba una cámara que iba a ser instalada en un cohete para investigar la atmósfera. Por azar, apuntaron hacia un fragmento claro del cielo sin dar importancia a que, bajo él, en el horizonte, se vislumbraban nubes de una tormenta cientos de kilómetros al norte. Dos fotogramas de su grabación mostraron sobre aquella lejana tormenta intensas emisiones luminosas con una extensión de decenas de kilómetros. Algunos años después, Davis D. Sentman, de la Universidad de Alaska en Fairbanks, se inspiró en *El sueño de una noche de verano*, de William Shakespeare, para bautizar a estas emisiones con el nombre de *sprites*, que en español podríamos traducir por espectros o duendes, evocando su naturaleza esquiva y un tanto misteriosa.

Los duendes observados por Winckler iniciaron una línea de investigación que ha cambiado radicalmente nuestra visión de la mesosfera, la capa de la atmósfera situada entre 50 y 100 kilómetros de altura. Antes tenida por inerte, la mesosfera ha pasado a considerarse el territorio en el que habita, junto a los duendes, una multitud de parientes de los rayos. A estas breves emisiones luminosas causadas por la actividad eléctrica de una tormenta se las denomina eventos luminosos transitorios (ELT).

OSCAR VAN DER VELDE, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Fotografía en colores reales de duendes en el norte de la provincia de Barcelona tomada en octubre de 2009. El arco mediterráneo español desde Almería al norte de Cataluña es la zona donde más duendes se producen en Europa. Constituye un auténtico laboratorio natural para la investigación de eventos luminosos transitorios.

Alejandro Luque es especialista en el desarrollo de modelos numéricos de plasmas y, en particular, de descargas eléctricas. Investiga en el Instituto de Astrofísica de Andalucía, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.



Francisco J. Gordillo Vázquez es físico de plasmas y experto en estudios cinéticos de plasmas de baja temperatura alejados del equilibrio. Trabaja en el Instituto de Astrofísica de Andalucía, donde dirige el grupo de plasmas transitorios en atmósferas planetarias.



Además de una gran belleza, esos «fuegos artificiales» naturales revisten un gran interés científico. Por un lado, su estudio nos permite ahondar en la física de la mesosfera, una de las capas atmosféricas más desconocidas. Por otro, su presencia puede alterar la composición química del aire y, tal vez, desempeñar un efecto global sobre la atmósfera y la circulación eléctrica entre sus capas y la superficie terrestre.

FÍSICA DE LAS DESCARGAS

Para comprender los procesos físicos que subyacen a los ELT debemos tener presente las leyes que rigen las descargas eléctricas en gases. La más importante nos dice que la energía de los electrones libres de la atmósfera es proporcional al cociente entre el campo eléctrico (E) y la densidad de moléculas del aire (N). Este cociente, E/N, se denomina *campo eléctrico reducido* y suele expresarse en townsends, en honor a John Sealy Townsend, pionero en el estudio de descargas eléctricas en gases a comienzos del siglo xx (un townsend equivale a 10^{-21} voltios multiplicados por metro cuadrado). Según otro de los principios básicos, los tiempos y las distancias característicos de las reacciones de esos electrones, como la ionización, son inversamente proporcionales a la densidad molecular.

Esas leyes de escala explican que en las capas altas de la atmósfera se produzcan descargas eléctricas kilométricas. Una descarga que a presión atmosférica presenta algunos centímetros de extensión y microsegundos de duración, a 75 kilómetros de altura (donde la densidad del aire es unas 30.000 veces inferior) equivale a una descarga de varios kilómetros y centésimas de segundo.

Dado que el número de electrones libres en el aire suele ser muy reducido, este medio constituye un buen aislante eléctrico (la débil conductividad que presenta se debe al movimiento de iones pesados). Sin embargo, si aplicamos un campo reducido intenso, alguno de esos escasos electrones libres puede adquirir energía suficiente para arrancar otro electrón al chocar contra una molécula, convirtiéndola en un ion con carga positiva. A su vez, este electrón secundario adquiere energía del campo eléctrico, con lo que puede ionizar otras moléculas. Si este proceso continúa, se produce una avalancha en la que el número de electrones libres disponibles para conducir la electricidad crece de forma exponencial. Se produce entonces la ruptura dieléctrica del aire. El campo reducido que la provoca se denomina campo umbral o de ruptura.

¿Cuál es el valor del campo umbral? Veamos primero qué les ocurre a los electrones libres de la atmósfera. Lo más frecuente es que estos choquen con una molécula y le arranquen un electrón o bien que sean atrapados por una molécula o átomo. El primer fenómeno (ionización por impacto electrónico) aumenta la densidad de electrones libres; el segundo (captura), la disminuye. Nuestra atmósfera está compuesta por un 79 por ciento de nitrógeno molecular y un 20 por ciento de oxígeno molecular (el 1 por ciento restante corresponde a gases residuales como el argón). Por tanto, las ionizaciones más frecuentes son la del oxígeno y la del nitrógeno. Por otra parte, en gases con una proporción notable de oxígeno, el principal mecanismo de pérdida de electrones corresponde a la captura disociativa, mediante la cual un electrón rompe una molécula de oxígeno pero queda acoplado a uno de sus dos átomos, que se convierte en un ion negativo.

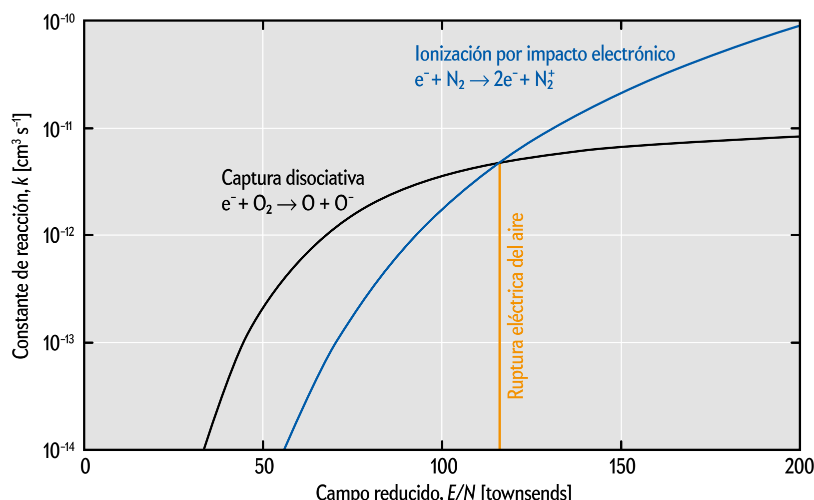
La probabilidad de la ionización y la captura depende de la energía de los electrones libres y, por tanto, del campo eléctrico reducido. Cuando el campo es débil, domina la pérdida de electrones (captura), por lo que su densidad es solo residual. Por el contrario, cuando el campo es intenso, cada electrón inicia una avalancha y la densidad de electrones crece rápidamente, transformando el aire en un buen conductor. El valor del campo a partir del cual pierde protagonismo la captura y empieza a dominar la ionización corresponde al campo umbral. Para aire seco asciende a unos 120 townsends; a presión atmosférica, ello equivale a un campo eléctrico de unos tres millones de voltios por metro.

Pero eso no es todo. Nuestro grupo de investigación ha demostrado en fecha reciente que, además de la ionización y la captura disociativa, hay otro mecanismo que también influye en las propiedades eléctricas de la alta atmósfera. Nos referimos al desprendimiento asociativo.

El desprendimiento asociativo es relevante a presiones bajas, como las de la atmósfera terrestre por encima de unos 15 kilómetros de altura. En este proceso, un átomo de oxígeno dotado de carga negativa colisiona con una molécula de nitrógeno, dando lugar a un óxido de nitrógeno y al desprendimiento del electrón inicialmente ligado al ion de oxígeno. Mediante este desprendimiento, los electrones inmovilizados por una captura disociativa del oxígeno atmosférico vuelven a quedar libres. Ello significa que puede producirse una ruptura eléctrica del aire con campos muy inferiores al campo umbral anterior. La única condición es que transcurra el tiempo necesario para que la densidad de iones negativos de oxígeno sea suficiente para compensar las pérdidas de electrones. Como veremos más adelante, este fenómeno podría explicar un tipo particular de duendes, los retardados.

EXCITACIONES, CHOQUES Y EMISIONES

Volviendo a los ELT, ¿qué tipo de radiación emiten y qué procesos microscópicos subyacen a dichas emisiones luminosas? Estas preguntas motivaron los primeros estudios de imagen y espec-



Las principales reacciones que determinan la densidad de electrones libres en el aire y, por tanto, la respuesta eléctrica del mismo son la ionización por impacto electrónico, que libera nuevos electrones, y la captura disociativa, que los inmoviliza. El campo eléctrico (E) por encima del cual domina la ionización y el aire se torna un buen conductor se denomina de ruptura. Puesto que la energía de los electrones libres de la atmósfera es proporcional al cociente entre el campo eléctrico y la densidad de moléculas del aire (N), suele hablarse del campo eléctrico reducido (E/N), expresado en townsends.

troscopía de duendes llevados a cabo en 1994 y 1995 de forma paralela e independiente por los grupos de Stephen B. Mende, de la Universidad de California en Berkeley, y Davis D. Sentman [*véase* «Resplandores entre la Tierra y el espacio», por Stephen B. Mende, Davis D. Sentman y Eugene M. Wescott; Investigación y Ciencia, octubre de 1997].

En esas primeras campañas se determinó que las emisiones ópticas procedentes de ELT eran muy breves: desde algunas milésimas de segundo hasta un máximo de 100 milésimas de segundo. Asimismo, se observó que los duendes emitían fugazmente luz roja y azul. Quedaba por descubrir qué mecanismos causaban estos colores así como la razón de su ubicación, rojo arriba y azul abajo.

Además de ionizar moléculas o sufrir capturas disociativas, los electrones libres del aire también pueden chocar con moléculas de nitrógeno y oxígeno, y con ello excitarlas a niveles energéticos superiores. Cuando de forma espontánea se desexcitan, estas emiten radiación cuya longitud de onda depende de la diferencia de energía entre el nivel de origen y el de llegada. Hasta la fecha, los estudios sobre el espectro de emisión de los duendes se han centrado en los intervalos comprendidos entre 320 y 460 nanómetros (ultravioleta cercano y azul) y entre 550 y 820 nanómetros (rojo e infrarrojo cercano). Estas observaciones han demostrado que las emisiones rojas y azul se deben a la desexcitación radiativa de moléculas de nitrógeno.

¿Por qué las emisiones rojas se observan a gran altura y las azules en cotas más bajas? La clave reside en otro fenómeno: la desexcitación colisional. En el tiempo que transcurre desde que un electrón excita a una molécula de nitrógeno hasta que esta emite un fotón, la molécula puede chocar con otra molécula del aire y transformar la energía de su excitación en energía cinética, con lo que no llega a emitir el fotón. La probabilidad de que la excitación de una molécula conduzca a la emisión de un fotón o termine en desexcitación colisional depende de la relación entre la vida media del estado excitado y el tiempo medio entre choques. Este tiempo es inversamente proporcional a la densidad del aire y, por tanto, crece exponencialmente con la altura.

Para facilitar la comprensión de este complejo fenómeno, prescindamos de la arcana notación espectroscópica y llamemos R al nivel que emite en rojo y A al que emite en azul. La energía necesaria para excitar una molécula de nitrógeno hasta el nivel R es menor que la necesaria para llevarla al nivel A. Por ello la excitación hacia R suele ser más frecuente que hacia A. Sin embargo, el estado R presenta una vida media unas 100 veces mayor que A. Por debajo de unos 55 kilómetros, las moléculas excitadas en R sufren tantas colisiones que nunca sobreviven lo suficiente para emitir radiación; las moléculas A, en cambio, sobreviven el tiempo suficiente para radiar. Por eso, aunque a gran altura dominan las emisiones en rojo puesto que las moléculas R son más abundantes que las A (requieren menos energía), por debajo de los 55 kilómetros vemos solo las azules.

Curiosamente, y a diferencia de lo observado en espectros de auroras polares, en los espectros de duendes no se observan líneas asociadas al decaimiento radiativo de átomos de oxígeno ni de nitrógeno excitados por colisiones con electrones libres. En las auroras se observan emisiones en verde (a 557,7 nanómetros) y rojo (a 630,0 y 636,4 nanómetros), procedentes ambas del decaimiento radiativo de átomos de oxígeno que los electrones libres excitan a estados metaestables (estados con una vida media de entre 1 y más de 100 segundos). A las alturas en donde habitan los duendes, estos estados metaestables son desactivados mediante choques con otras moléculas (desexcitación colisional) antes de poder emitir radiación alguna. No pasa así con las auroras porque emiten mucho más arriba, por encima de los 120 kilómetros, donde la presión es muy baja y apenas hay partículas que puedan chocar con los átomos de oxígeno excitados.

PLASMAS Y FILAMENTOS

Hasta ahora hemos descrito el comportamiento del aire bajo la acción de un campo eléctrico externo y homogéneo. Sin embargo, la realidad es más compleja. Es el momento de adentrarnos en la física macroscópica de los ELT, la que describe lo que ocurre a escalas que van desde metros a algunos kilómetros.

Las cargas que, en forma de electrones e iones, libera la ruptura eléctrica del aire responden también al campo eléctrico. Empujadas por este, pueden llegar a acumularse en forma de plasma (se denomina plasma a un conjunto de partículas cargadas que interaccionan mediante campos eléctricos o electromagnéticos pero cuya carga neta total es aproximadamente cero). Las descargas eléctricas corresponden a una de las formas de plasma más frecuentes en la naturaleza.

Las propiedades de plasma de muchas descargas eléctricas se manifiestan de forma clara en unas estructuras denominadas dardos (*streamers*). Son los precursores de casi todas las descargas eléctricas a presión elevada y forman los tentáculos que podemos ver en los duendes y otros ELT. Se trata de filamentos

de gas ionizado que se propagan a través de un campo eléctrico menor que el campo de ruptura.

El interior del dardo se comporta como un buen conductor, que responde al campo externo moviendo sus electrones en sentido opuesto al mismo. Así como un conductor altera el campo eléctrico que lo envuelve concentrándolo en sus puntas y salientes, un dardo concentra el campo eléctrico en las proximidades de su extremo. Si esta concentración es suficiente para llevar el campo eléctrico externo a rebasar el campo de ruptura, el aire se ioniza justo en el pequeño volumen frente al extremo, lo que permite que el filamento ionizado crezca. El proceso continúa y el filamento se propaga, de modo que llega a producirse la ruptura del aire incluso en zonas en las que un campo externo por sí solo no bastaría.

La principal propiedad de un dardo es su capacidad de generar campos localizados y de gran intensidad. Ello aporta una gran energía a ciertos electrones, lo que les permite iniciar en un gas frío reacciones químicas que, de otra forma, requerirían temperaturas altísimas. Por ello resultan de gran utilidad en procesos industriales como la limpieza o descontaminación de flujos gaseosos y la iniciación de la combustión. En la naturaleza, los dardos constituyen los precursores de los rayos y los componentes más activos de los duendes.

Los dardos no escapan a la ley de escala según la cual las distancias características de una descarga son inversamente proporcionales a la densidad del aire. A presión atmosférica, un filamento presenta algunos milímetros de diámetro; en la mesosfera, decenas de metros.

A gran altura (entre 70 y 90 kilómetros) se produce otro tipo de descarga eléctrica: la descarga difusa o halo. Esta ocurre cuando falla el mecanismo de focalización del campo eléctrico de los filamentos. Puede ocurrir bien porque el volumen de una descarga no basta para acomodar el diámetro de los filamentos o bien porque, como sucede en las capas más altas de nuestra atmósfera, el aire ya parte de un estado fuertemente ionizado.

En la Tierra, la radiación solar ultravioleta o, durante la noche, la precipitación de partículas energéticas de los rayos cósmicos mantienen una ionización continua en la parte más externa de nuestra atmósfera. A partir de unos 85 kilómetros de altura, esta ionización es suficiente para reflejar las ondas de radio; a la capa atmosférica que se extiende desde esta altura hasta los 600 kilómetros se la denomina ionosfera.

Esa ionización impide la formación de descargas filamentosas. Ello se debe a que la propagación de un dardo requiere una gran diferencia de conductividad entre este y el aire que lo circunda; si el aire ya está ionizado, los campos eléctricos se relajan demasiado rápido para activar el mecanismo de propagación. El resultado puede ser entonces una descarga difusa y mucho más homogénea que un dardo. Halos y dardos consti-

ESPECTROSCOPÍA

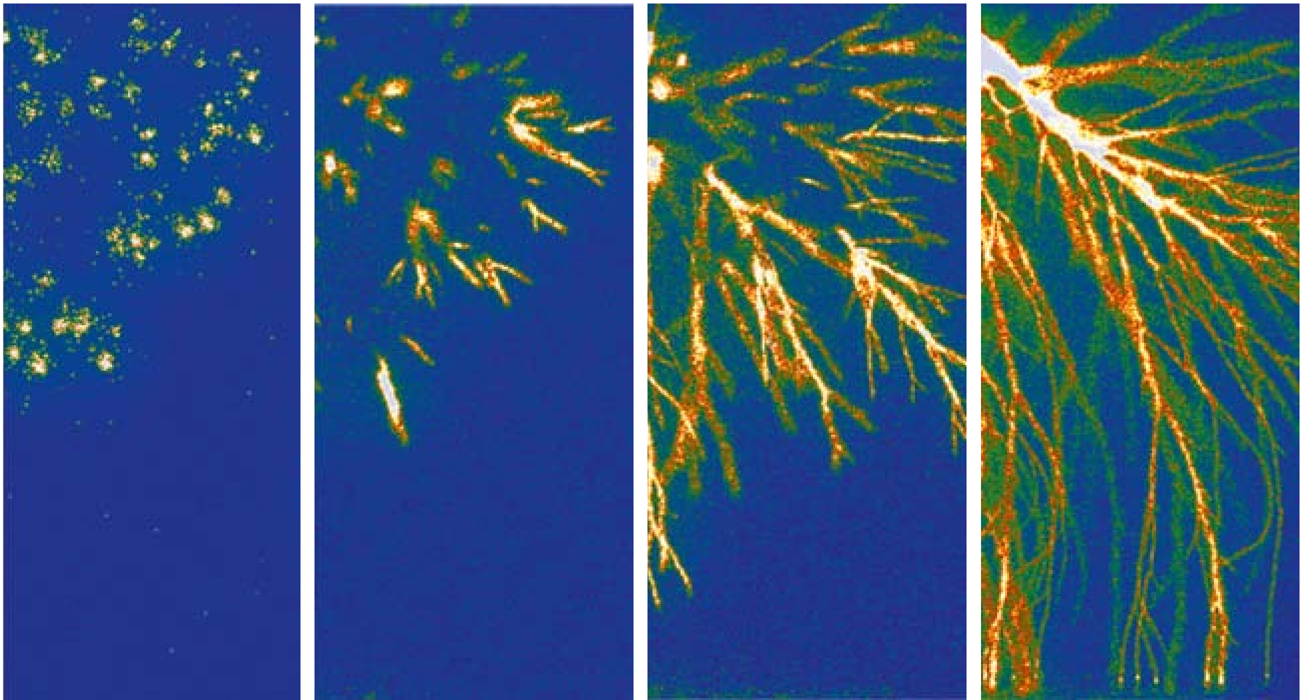
El porqué de los colores

Los duendes presentan dos franjas de colores: arriba, entre los 55 y 90 kilómetros de altura, son rojizos; abajo, entre 40 y 55 kilómetros, azulados. Ambos colores se deben a la relajación radiativa espontánea de moléculas de nitrógeno que previamente han adquirido el estado excitado R (que emite luz roja) o A (que emite luz azul), debido a la colisión con electrones libres. Pero ¿por qué las emisiones rojas se observan a gran altura y las azules en cotas más bajas?

Para responder esa cuestión debemos tener en cuenta otro fenómeno que afecta a las moléculas de nitrógeno: la desexcitación colisional. Además de sufrir desactivación radiativa espontánea, en la que emiten radiación roja (las R) o azul (las A), estas también pueden experimentar una desactivación colisional, al chocar con otras moléculas del aire. Que domine un proceso u otro (desactivación radiativa o colisional) depende de la vida media del estado excitado (lo que determina la probabilidad de desactivación radiativa) y de la altura (lo que determina la densidad del aire y, por tanto, la probabilidad de chocar con otras moléculas). A cotas bajas, solo las moléculas en el estado excitado A, más efímeras, llegan a emitir radiación antes de ser desactivadas por una colisión; por ello predomina la luz azul. A mayor altura, en cambio, donde las colisiones son menos probables, predomina la luz roja debida a la desactivación radiativa de las moléculas R, más abundantes.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA



Las descargas eléctricas en el aire suelen iniciarse por dardos de gas ionizado (*streamers*). Estos se propagan gracias al intenso campo eléctrico que opera en sus extremos, donde se concentra la energía. Esta secuencia de imágenes (captadas con una cámara rápida) de filamentos generados en un laboratorio muestra que las emisiones ópticas surgen solo de la reducida zona de campo intenso alrededor de los extremos de las ramificaciones. Los fotogramas corresponden, de izquierda a derecha, a tiempos de exposición de 2, 10, 50 y 300 nanosegundos. Los tiempos equivalentes para un duende a 80 kilómetros de altura serían 0,2, 1, 5 y 30 milisegundos. Esta figura ilustra que los filamentos de una descarga eléctrica gaseosa, como los de un duende, son en realidad dardos, en los que solo emite una pequeña región de campo intenso cerca de sus extremos.

tuyen, pues, los mecanismos principales que dan cuerpo a las descargas eléctricas en la alta atmósfera.

EL ZOO DE LOS ELT

Una vez descrita la anatomía de los ELT, centrémonos ahora en su taxonomía. Comenzamos por los duendes que observaron Winckler y sus colaboradores. Se trata de la «especie» más frecuente de ELT. Corresponden a descargas filamentosas extremadamente luminosas que se extienden en alturas de entre 50 y 85 kilómetros. Presentan un diámetro de algunas decenas de kilómetros y duran centésimas de segundo.

Los duendes surgen siempre del campo eléctrico producido por un rayo en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera, que se extiende hasta los 15 kilómetros de altura. Pero no todos los rayos engendran duendes. El 90 por ciento de las descargas entre una nube y el suelo corresponden a rayos negativos (transportan una carga negativa de la nube a la tierra). En cambio, casi todos los duendes observados hasta la fecha han sido producidos por rayos positivos (que transportan carga positiva). El duende suele producirse solo algunos milisegundos después del rayo. Sin embargo, en numerosas ocasiones se han observado duendes iniciados cientos de milisegundos después: nos referimos a los duendes retardados.

La diferencia entre duendes rápidos y duendes retardados estriba en la dinámica microscópica de la que hemos hablado antes. Recordemos que la generación y pérdida de electrones libres en un plasma de aire está dominada por dos fenómenos: la ionización y la captura disociativa. Si consideramos solo estos dos procesos, la ruptura eléctrica se produce por encima de 120 townsends (cuando se generan más electrones que los que se pierden). Pero si entra en escena un tercer actor, el desprendimiento asociativo, el balance se altera. Este proceso puede llegar a inducir una ruptura con campos inferiores al umbral, siempre que transcurra el tiempo necesario para que se acumule una densidad suficiente de iones negativos de oxígeno.

A la altura de los duendes, ese tiempo es del orden de decenas de milisegundos, precisamente lo que suele necesitar un duende retardado para iniciarse. Ello nos ha llevado a sugerir en un trabajo reciente que el desprendimiento asociativo constituye la clave para entender los duendes retardados. A raíz de nuestra propuesta, T. Neubert, del Instituto Danés de Ciencias del Espacio, N. Liu, de la Universidad de Florida, y R. Marshall, de la Universidad de Stanford, han empezado a estudiar el efecto del desprendimiento asociativo en la microfísica de otros ELT.

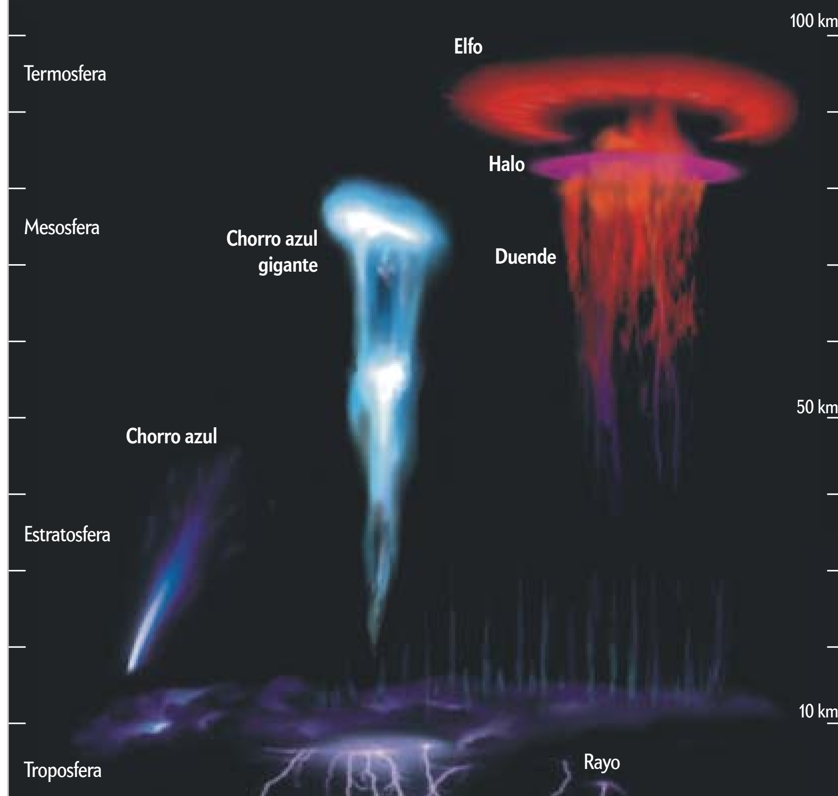
Amén de los rápidos y los retardados, existen también los duendes columniformes (*C-sprites*) y los de tipo «zanahoria». Los columniformes están formados por un número reducido de filamentos (menos de diez) que se propagan verticalmente en paralelo y que parecen no interaccionar entre sí. Los de tipo zanahoria, en cambio, constan de centenares o tal vez miles de filamentos que se propagan tanto hacia arriba como hacia abajo con una importante componente horizontal debido a la repulsión electrostática entre ellos —de ahí la forma de zanahoria que les da nombre.

Los duendes esconden también subestructuras llamativas. Una de ellas corresponde a los persistentes puntos brillantes que

EL ZOO DE LOS ELT

Una familia luminosa

En la región de la atmósfera entre las nubes de tormenta y la ionosfera conviven, junto a los duendes, una gran variedad de fenómenos eléctricos luminosos.



jalonan el recorrido de un filamento. Por su semejanza con los abalorios ensartados en un collar, se denominan cuentas (*beads*). En 2011 publicamos un artículo en *Geophysical Research Letters* en el que proponíamos que las cuentas de un duende pueden hacer manifiestas las inhomogeneidades en la densidad o en la concentración de electrones de la alta atmósfera, hasta ahora difíciles de observar. Los duendes cobrarían, pues, un interés adicional, puesto que podrían considerarse sondas naturales que escudriñan las escalas espaciotemporales más pequeñas de la física mesosférica.

Fijémonos ahora en los halos, las descargas difusas de la mesosfera. Enormes destellos entre los 80 y los 90 kilómetros de altura, con diámetros de unos 100 kilómetros y forma de cuenco, los halos duran entre uno y dos milisegundos. Pueden aparecer solos o junto a un duende. Dado que en una descarga difusa no actúan los mecanismos de focalización de un campo eléctrico, los campos máximos alcanzados en un halo son muy inferiores a los de un duende. En consecuencia, las intensidades luminosas también son menores.

Otro miembro de esta familia de fenómenos luminosos corresponde a los chorros azules (*blue jets*). Desde comienzos del siglo XX existen testimonios de la observación de alargadas columnas de intenso color azul elevándose por encima de nubes de tormenta. Sin embargo, hasta el verano de 1994 no se realizaron, en Arkansas, las primeras fotografías detalladas y vídeos de intensas descargas eléctricas que emitían destellos azules muy brillantes en forma de chorro procedentes de las partes altas (entre 15 y 18 kilómetros) de nubes de tormenta con un gran aparato eléctrico asociado. Estas descargas eléctricas ascendentes avanzan a unos 100 kilómetros por segundo y se caracterizan por unas emisiones de color azulado y cian que duran unos 200 milisegundos. Pueden llegar hasta los 45 kilómetros de altura y comienzan en la parte alta de nubes de tormenta de las que surgen abundantes rayos, sobre todo negativos.

Las teorías actuales describen los surtidores azules como descargas eléctricas de tipo dardo positivo, esto es, con una concentración de carga eléctrica positiva en el frente o cabeza. En 1995 se publicaron los primeros estudios sobre chorros azules y en 1996 el primer trabajo sobre los iniciadores azules (*blue starters*), la primera fase de los chorros azules (se propagan solo hasta unos 25 kilómetros de altura). En 2002 se amplió la familia: se detectaron los chorros azules gigantes; estos emergen a entre 10 y 20 kilómetros de altura pero pueden llegar a alcanzar la baja ionosfera a unos 90 kilómetros, es decir, que pueden llegar a conectar la troposfera con la baja ionosfera terrestre. Al contrario que los chorros azules estándar, los surtidores gigantes parecen transportar carga negativa hacia la ionosfera.

El canal más rápido por el que la energía de los rayos troposféricos se transfiere a la alta mesosfera y baja ionosfera corresponde a los pulsos electromagnéticos procedentes de la corriente generada por los rayos. A estos pulsos se deben otro de los eventos luminosos transitorios que ocupan este artículo: los elfos o *elves*, acrónimo de e*missions of* l*ight and* VLF *(very low frecuency) perturbations due to* EMP *(electromagnetic pulses)* s*ources*. Aunque predichos en 1991, no fueron detectados y fotografiados hasta 1996. Los elfos suelen aparecer en forma de resplandor de luz difusa muy poco después del rayo al que están asociados y justo antes de que aparezcan los duendes. Presentan el aspecto de un toroide o rosquilla situado a entre 85 y 95 kilómetros de altura con una anchura vertical inferior a 10 kilómetros y un diámetro de entre 150 y 450 kilómetros.

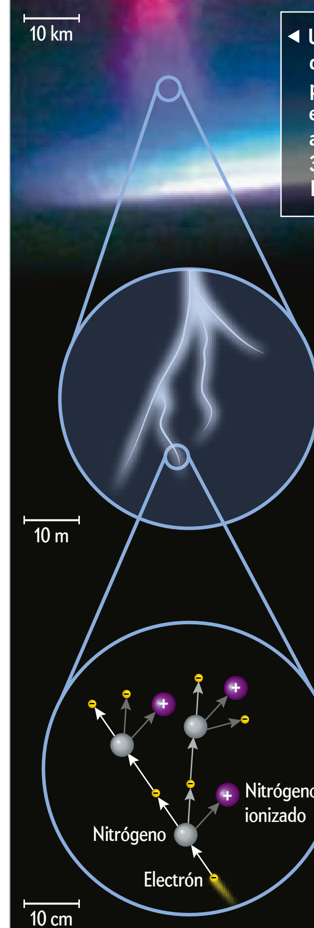
Los elfos no corresponden, por tanto, a descargas eléctricas, sino a pulsos electromagnéticos que, además de producir unas fugaces emisiones ópticas de apenas 1 milisegundo de duración, también calientan e ionizan la alta mesosfera y baja ionosfera terrestre, lo que puede alterar las propiedades químicas y eléctricas de las mismas.

¿Qué sabemos del espectro de emisión de estos nuevos ELT? ¿Emiten en otros rangos además del visible? Las señales (bandas) correspondientes al nitrógeno molecular en los espectros de duendes y halos corresponden al ultravioleta cercano (entre 300 y 400 nanómetros) y al infrarrojo cercano (hasta 1500 nanómetros). Sin embargo, hasta la fecha solo se ha explorado el espectro de los duendes hasta los 880 nanómetros.

ESTRUCTURA

Las escalas de un duende

Las descargas en la alta atmósfera son producidas por mecanismos físicos que actúan en escalas espaciales muy diversas.



❶ Los **duendes** como el de esta imagen corresponden a descargas con un tamaño de decenas de kilómetros y compuestas de cientos de filamentos de gas ionizado.

◀ **Una de las primeras fotografías de duendes en colores reales, tomada por el equipo de Davis D. Sentman el 4 de julio de 1994 desde un avión a 14 kilómetros de altura y a unos 300 kilómetros del fenómeno luminoso.**

❷ Cada uno de los **filamentos** es un buen conductor de la electricidad que incrementa el campo eléctrico cerca de su extremo.

❸ El campo eléctrico acelera a los electrones libres, con lo que adquieren suficiente energía para arrancar otro electrón al chocar contra una molécula, convirtiéndola en un ion con carga positiva. A su vez, este electrón secundario adquiere energía del campo eléctrico, con lo que puede ionizar otras moléculas. Se produce entonces una avalancha que incrementa la conductividad del aire y alimenta la propagación del filamento. La escala espacial está determinada por la distancia media entre colisiones ionizantes, que es de algunos centímetros. Las colisiones no ionizantes, mucho más frecuentes, tienen una escala muy inferior y no están representadas en la figura.

Estudios recientes indican que la parte central de los duendes emite en el infrarrojo cercano mientras que las zonas superior e inferior lo hacen en el visible. También se ha observado que los espectros de duendes, halos y cuentas son prácticamente iguales en el visible; en cambio, se han predicho diferencias notables en el ultravioleta y el infrarrojo cercano (regiones espectrales en donde se ponen de manifiesto los diferentes campos eléctricos que producen estos tres tipos de ELT). Las simulaciones teóricas también sugieren que los duendes y halos emiten en el ultravioleta de vacío (UVV) entre 150 y 250 nanómetros (sin embargo, ello solo podría detectarse desde el espacio, debido a la enorme opacidad de la atmósfera en esas longitudes de onda). Poco se conoce sobre las emisiones ópticas de los chorros azules o los chorros azules gigantes ya que no existen registros espectroscópicos de estos ELT; solo se sabe que la luz que emiten es azulada.

EFECTOS PLANETARIOS

La última parada en nuestro recorrido por las escalas de la física de los ELT es la que abarca miles de kilómetros y engloba la Tierra entera. Las descargas en la alta atmósfera desempeñan una función relevante en fenómenos a escala planetaria como el circuito eléctrico global, la circulación de corriente entre la superficie terrestre y la ionosfera.

En la Tierra, las nubes de una tormenta eléctrica operan a modo de «batería». A través de mecanismos microscópicos que involucran la presencia de hielo, agua y vapor, estas transforman (mediante la separación de cargas en su interior) parte de la energía mecánica de la atmósfera en energía electrostática. En general, las capas inferiores de las nubes adquieren carga negativa y las superiores positiva (ello explica que el 90 por ciento de las descargas nube-tierra presenten polaridad negativa). Puesto que las gotas de lluvia transportan hacia el suelo una (ligera) carga también negativa, las tormentas confieren carga negativa al suelo.

Al ser la Tierra un buen conductor eléctrico, esta carga viaja rápidamente a otras zonas de la superficie del planeta. Lejos de la tormenta, en las áreas despejadas, la tierra se descarga mediante una corriente continua de unos 2×10^{-12} amperios por centímetro cuadrado que conecta la superficie con la ionosfera. Aunque el aire es un mal conductor, la presencia de iones pesados y aerosoles cerca de la superficie basta para mantener esta leve corriente.

El segmento que falta para cerrar el circuito eléctrico es el que une la ionosfera con la parte superior de las nubes. Justo en este espacio habitan los ELT. Cabe resaltar que aunque la luminosidad de una descarga en la alta atmósfera dura como máximo algunas centésimas de segundo, sus efectos, en especial sobre la conductividad del aire, pueden ser mucho más persistentes. Cuantificar el efecto de los ELT sobre el circuito eléctrico global constituye uno de los retos actuales en este campo de investigación. La observación de descargas extensas como los chorros gigantes, que unen las nubes con la ionosfera, sugiere que los ELT desempeñan una función relevante en las propiedades eléctricas de la atmósfera terrestre. Los chorros azules gigantes transfieren una importante carga negativa (alrededor de –150 culombios) del suelo a la baja ionosfera. Por tanto, los chorros azules (dardos positivos) contribuirían a cargar el circuito eléctrico global mientras que los chorros azules gigantes (dardos negativos) lo descargarían.

Los ELT afectan también a la química atmosférica. Los procesos subyacentes a estos eventos, como la ionización por impacto electrónico y el desprendimiento asociativo, alteran el número de electrones e iones libres en el aire. Ello no afecta solo a la conductividad eléctrica de la atmósfera, sino también a su composición química: esos iones y, sobre todo, electrones contribuyen a la formación de átomos y moléculas excitados que, a su vez, participan en reacciones químicas que acaban modificando las concentraciones en la alta atmósfera de especies como los óxidos de nitrógeno (en especial el NO y N_2O), que desempeñan un papel destacado en la formación del ozono atmosférico.

Si bien los modelos teóricos indican que los ELT alteran la composición química de la atmósfera que los circunda, ello aún no se ha comprobado experimentalmente. Varias misiones internacionales incluyen esta cuestión entre sus objetivos. Entre ellos el proyecto COBRAT de globos estratosféricos del Centro

Nacional de Estudios Espaciales francés (CNES), con importante colaboración española. También se están desarrollando refinados modelos cinéticos para estudiar el impacto químico de los ELT a escala global. En paralelo, existen esfuerzos internacionales encaminados a detectar desde diversas plataformas, como la Estación Espacial Internacional y diversos satélites que se lanzarán en los próximos años, las emisiones ópticas asociadas a las especies químicas afectadas por la presencia de ELT en la atmósfera terrestre.

EL FUTURO

Desde aquella noche de verano en la que el equipo de Winckler observó los primeros duendes hemos aprendido mucho. Ahora conocemos la existencia de fenómenos en la alta atmósfera mucho más variados y complejos de lo que anticipaba el sencillo razonamiento de visionarios como C. T. R. Wilson, que ya en 1925 se anticipó al descubrimiento de las descargas eléctricas en la alta atmósfera y propuso un mecanismo para las mismas que aún hoy se considera fundamentalmente correcto [*véase* «El rayo», por Joseph R. Dwyer; Investigación y Ciencia, julio de 2005]. La comprensión de la electricidad atmosférica se extiende mucho más allá del estudio de los rayos. Comenzamos a intuir la gran riqueza de procesos físicos y químicos que esconde la alta atmósfera terrestre.

Prueba de la explosión en el interés que los ELT han despertado en la comunidad científica es la cantidad de proyectos previstos para explorarlos. La misión ASIM (*Atmospheric Space Interaction Monitor*) de la Agencia Espacial Europea, con participación española del CSIC, el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y las universidades Politécnica de Cataluña (UPC), de Valencia (UV) y Rey Juan Carlos (URJC), instalará un módulo de observación de ELT en la Estación Espacial Internacional a partir de 2015. Allí acompañará a la misión japonesa JEM-GLIMS, con objetivos parecidos. La agencia espacial rusa lanzó en mayo de 2012 el microsatélite CHIBIS. La agencia espacial francesa lanzará en 2015 el microsatélite TARANIS, cuyas observaciones serán complementadas por globos estratosféricos del programa COBRAT.

Otra de las grandes cuestiones que ocupará a los expertos durante las próximas décadas es la posible existencia de ELT en otros planetas del sistema solar. Sabemos que existe actividad eléctrica en Venus, Júpiter y Saturno; es posible, por tanto, que esta electricidad se refleje en emisiones en las capas más altas de sus atmósferas.

Los próximos veinte años de estudio sobre electricidad en la alta atmósfera se presentan cargados de desafíos y de la esperanza de nuevos hallazgos sorprendentes. Los investigadores de este campo estamos preparados para otros años tan fértiles y apasionantes como los veinte anteriores.

PARA SABER MÁS

Physics and chemistry of the upper atmosphere. M. H. Rees. Cambridge University Press, 1989.

Gas discharge physics. Yu. P. Raizer. Springer Verlag, 1991.

Lightning: physics and effects. V. A. Rakov y M. A. Uman. Cambridge University Press, 2003.

Review of recent results on streamer discharges and their relevance for sprites and lightning. U. Ebert et al. en *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, A00E43, 2010.

Mesospheric electric breakdown and delayed sprite ignition caused by electron detachment. A. Luque y F. J. Gordillo Vázquez en *Nature Geoscience*, vol. 5, págs. 22-25, enero de 2012.



Simón Baron-Cohen es profesor de psicopatología del desarrollo en la Universidad de Cambridge y director del Centro de Investigación del Autismo.

BIOLOGÍA

AUTISMO Y MENTE TÉCNICA

La progenie de científicos e ingenieros quizás herede genes que no solo confieren capacidades intelectuales, sino también una predisposición al autismo

Simon Baron-Cohen

Con mi colaboradora Sally Wheelwright encuesté en 1997 a una muestra de casi dos mil familias del Reino Unido. A alrededor de la mitad las incluimos porque tenían, al menos, un niño con autismo, trastorno del desarrollo que provoca comportamientos obsesivos y dificulta la comunicación e interacción con los demás. Las otras familias tenían hijos a los que se les había diagnosticado el síndrome de Tourette, el de Down o retrasos en el lenguaje, pero no autismo. Hacíamos a los progenitores esta sencilla pregunta: ¿en qué trabajan ustedes? Muchas de las madres no habían trabajado fuera del hogar, así que no nos aportaban un dato que nos resultase útil, pero los resultados correspondientes a los padres fueron fascinantes: el 12,5 por ciento de los padres de los autistas eran ingenieros, frente a solo un 5 por ciento de los padres de los niños sin autismo.

De forma análoga, el 21,2 por ciento de los abuelos (masculinos) de esos niños con autismo habían sido ingenieros, frente a un 2,5 por ciento de los abuelos de los niños sin autismo. La pauta se repetía en las dos ramas de la familia. Era más frecuente que el padre de las mujeres con niños autistas hubiera sido ingeniero, y también que estas se hubieran casado con alguien cuyo padre lo había sido.

¿Coincidencia? Me parece que no.

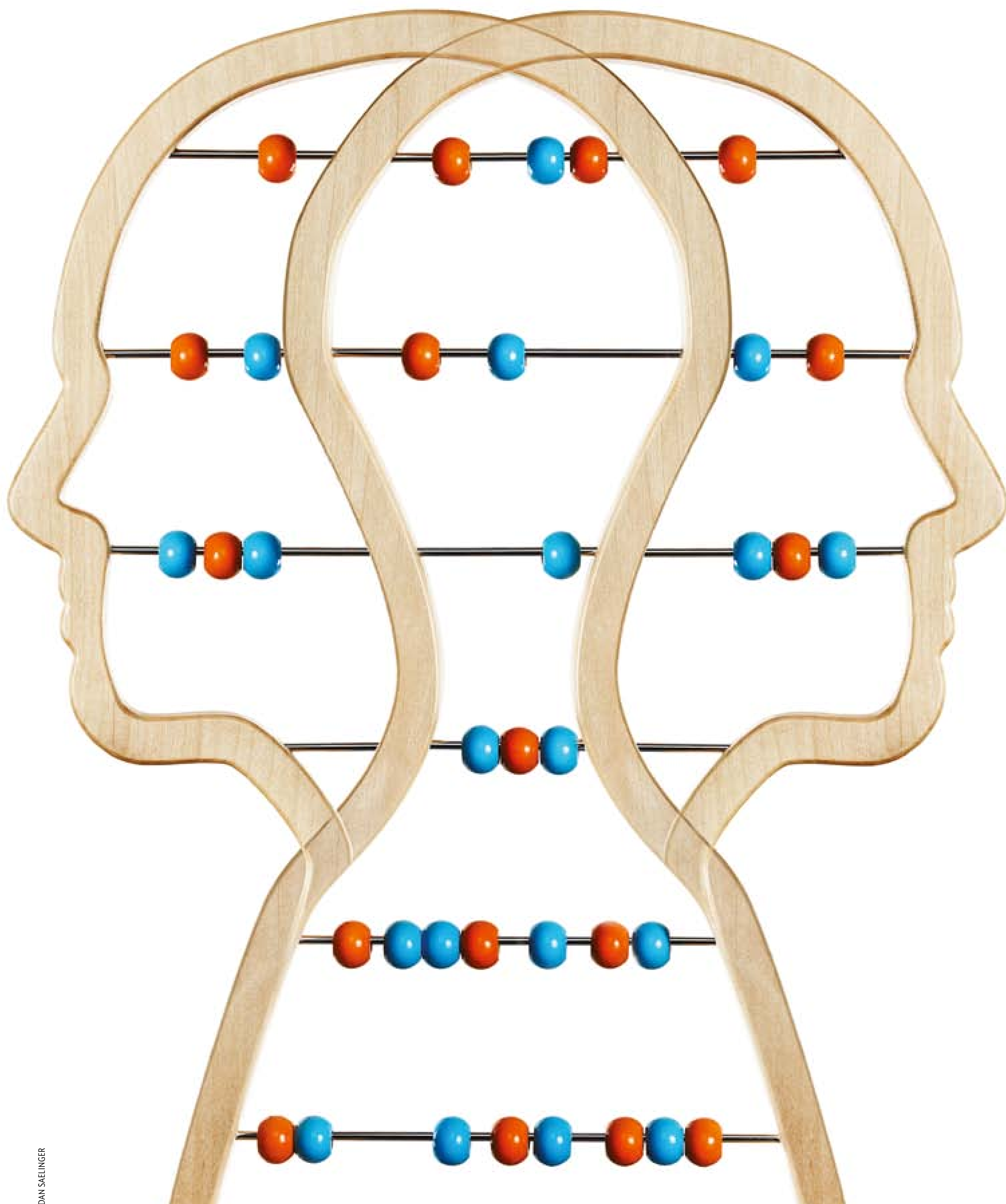
Entre las posibles explicaciones se cuenta un fenómeno, el «emparejamiento selectivo» o «emparejamiento por afinidad», que viene a ser algo así como eso de «cada oveja con su pareja». Me topé con la idea en 1978, en la Universidad de Oxford, durante un cursillo de estadística para estudiantes, cuando la instructora me dijo —posiblemente para hacer más amena esa disciplina— que los compañeros sexuales no lo son por puro azar. Al pedirle que fuese más explícita, me puso como ejemplo la estatura: las personas altas tienden a emparejarse con personas altas y las bajas, con las bajas. La estatura no es la única característica que influye, consciente o inconscientemente, en la elección de pareja. La edad o el tipo de personalidad cuentan también, entre otros factores. Ahora, treinta años después, mis colaboradores y yo estamos verificando si el emparejamiento por afinidad puede explicar la persistencia del autismo en la población general. ¿Sería posible que las personas de mentali-

EN SÍNTESIS

En Silicon Valley y en otras zonas donde abundan las personas que se dedican a la técnica se dan índices de autismo excepcionalmente elevados. Quizá refleje un vínculo entre genes que contribuyen al autismo y genes en que se basa la aptitud técnica.

Cuando se emparejan dos personas con mentalidad técnica, es posible que sus hijos no solo hereden genes que les confieran capacidades cognitivas útiles, sino también genes subyacentes al desarrollo del autismo.

Además, elevadas concentraciones de testosterona en el útero durante la gestación podrían contribuir al desarrollo tanto de una mente técnica como de una autista.



DAN SAELINGER

dad técnica (caso de ingenieros, científicos, informáticos o matemáticos), al casarse con individuos de igual mentalidad, o cuando lo hacen sus hijos, transmitiesen grupos asociados de genes que no solo dotasen a su progenie de talentos cognitivos útiles, sino que aumentasen también la probabilidad de que manifieste el autismo?

COMPROBACIÓN DEL SISTEMA

Comencé a estudiar el autismo en los años ochenta. Por entonces, la teoría psicogénica del autismo —que la causa del autismo reside en el desinterés afectivo de las madres por sus hijos— había sufrido una refutación completa. Michael Rutter, en la actualidad en el King's College de Londres, y otros que habían estudiado el autismo en gemelos habían hecho ver que era muy heredable. La genética interviene, no el comportamiento de los padres.

Hoy se sabe que la probabilidad de que un gemelo univitelino de un autista desarrolle autismo es alrededor de 70 veces mayor que para individuos que no estén emparentados. Se han descubierto asociaciones entre el autismo y genes específicos, pero no se ha encontrado un grupo de genes que pronostique en quiénes se desarrollará el trastorno. La genética del autismo es mucho más compleja que eso. No obstante, mi interés se ha centrado en saber por qué, para empezar, sobreviven los genes del autismo. El autismo limita la capacidad de reconocer e identificar las emociones ajenas y dificulta las relaciones con los demás, lo que, a su vez, reduce las posibilidades del autista de tener descendencia a la que transferir sus genes.

Una posibilidad es que los genes responsables del autismo persistan generación tras generación porque se cohereden con genes asociados a ciertas capacidades cognitivas comunes a los autistas y a las personas de mentalidad técnica, ese tipo de personas a la que en inglés coloquial algunos llamarían *geeks*, «bichos raros» apasionados por la tecnología en alguno de sus aspectos. En pocas palabras, algunos *geeks* podrían vehicular los genes del autismo: tal vez no manifiesten signos de autismo grave en su vida, pero cuando se emparejan y procrean, sus hijos pueden cargar una doble dosis de genes y rasgos autistas. De este modo, el emparejamiento por afinidad entre personas de mentalidad técnica podría propagar los genes del autismo.

Dado que *geek* no es precisamente un término científico, y que a algunos quizá les parezca peyorativo, tuve que formular una definición más precisa de las capacidades cognitivas compartidas por las personas de mentalidad técnica y los autistas. Hace unos diez años, encuestamos junto con Wheelwright a cerca de cien familias que tenían al menos un hijo autista; les hicimos otra pregunta fundamental: ¿en qué consiste la obsesión de su hijo? Recibimos respuestas muy variadas: la memorización de horarios de ferrocarriles, aprenderse los nombres de cada miembro de una categoría (dinosaurios, coches o setas, por ejemplo), situar en determinadas posiciones los interruptores eléctricos de la casa y dejar correr el agua en el fregadero o el lavabo y salir corriendo al exterior para ver cómo sale por el desagüe.

A primera vista, esos comportamientos tan dispares no parecen compartir gran cosa, pero todos son ejemplos de sistematización. Defino sistematización como un impulso que conduce a analizar o construir sistemas, sean mecánicos (como un coche o un ordenador), naturales (la nutrición) o abstractos (las matemáticas). La sistematización no se restringe a la tecnología, la ingeniería y las matemáticas. Algunos sistemas son incluso de carácter social, como los negocios, y otros entrañan ambiciones artísticas, como la danza clásica o tocar el piano. Todos los sistemas se atienen a reglas. Al sistematizar se identifican las reglas que gobiernan el sistema para poder predecir su funcionamiento. Este impulso fundamental de sistematizar podría explicar por qué a los autistas les encanta la repetición y se resisten a los cambios inesperados.

De nuevo en colaboración con Wheelwright, actualmente en la Universidad de Southampton, sometí a prueba la posible conexión entre la sistematización y el autismo. Descubrimos que los niños con síndrome de Asperger (una forma de autismo que no entraña deficiencias de lenguaje o de inteligencia) superaban en tests de comprensión mecánica a niños de mayor edad que se estaban desarrollando de modo ordinario. Descubrimos también que, en promedio, los niños y los adultos con síndrome de Asperger obtenían puntuaciones más elevadas en las medidas de la sistematización, se basasen en sus propias respuestas o en las de sus padres. Finalmente, encontramos que los individuos con Asperger obtenían puntuaciones superiores en los tests de atención a los detalles. La atención a los detalles es condición previa para una buena sistematización. Cuando se trata de comprender un sistema, hay todo un mundo de diferencia entre detectar correctamente los pequeños detalles y errar en una diminuta variable del sistema (piénsese en las consecuencias de un error en un dígito al efectuar un cálculo). Cuando aplicamos a padres y madres de niños autistas este test de atención, resultaron ser más rápidos y precisos que progenitores de los niños con un desarrollo ordinario.

No son los ingenieros las únicas personas de mentalidad técnica que podrían albergar genes del autismo. En 1998, Wheelwright y el autor vimos que los estudiantes de matemáticas de la Universidad de Cambridge respondían que se les había diagnosticado formalmente autismo con una frecuencia relativa nueve veces mayor que los de humanidades; en la noción de autismo se incluía el síndrome de Asperger, que en la próxima edición del DSM-V —prevista para 2013—, el manual de referencia que establece los criterios para definir y diagnosticar los trastornos mentales, va a quedar integrado en un categoría más amplia, la de los «trastornos del espectro del autismo». Solo un 0,2 por ciento de los estudiantes de humanidades sufría de autismo, cifra no muy distinta de la registrada por entonces en la población general; en cambio, nada menos que el 1,8 por ciento de los estudiantes de matemáticas lo padecían. También descubrimos que la frecuencia del autismo entre los hermanos de matemáticos era cinco veces mayor que entre los hermanos de estudiantes de humanidades.

Para otra verificación del posible vínculo entre autismo y matemáticas, creamos una métrica para evaluar en la población general los rasgos asociados con el autismo; la llamamos «cociente de espectro autista». Consta de 50 componentes, representativos de otros tantos rasgos. Nadie puntúa cero en el test. En promedio, los hombres con un desarrollo ordinario puntúan 17 sobre 50; las mujeres, 15 sobre 50. Los autistas suelen sacar más de 32. Sometimos al test a vencedores de la Olimpiada Matemática Británica; puntuaron, en promedio, 21 sobre 50. Este patrón sugiere que, con independencia de los diagnósticos oficiales, el talento matemático se asociaba también a un mayor número de rasgos de autismo.

EL FENÓMENO SILICON VALLEY

Una de las formas de verificar la teoría del emparejamiento por afinidad consiste en comparar parejas en las que ambos miembros sean intensamente sistematizadores con parejas en las que

solo uno, o ninguno, lo sea. En las parejas de dos sistematizadores pudiera ser más probable una descendencia autista. He creado con mis colaboradores un sitio en la Red donde los padres pueden comunicar sus estudios universitarios, sus ocupaciones actuales y si sus hijos presentan autismo o no (www.cambridgepsychology.com/graduateparents).

Entre tanto, estamos explorando la teoría desde otros ángulos. Si existieran genes para la aptitud técnica asociados a genes del autismo, el autismo debería ser más frecuente en aquellos lugares donde moran, trabajan y se casan las gentes más sistematizadoras: lugares como Silicon Valley, el «valle del Silicio», en California, donde, según algunos, la incidencia del autismo es hasta diez veces superior al promedio de la población general.

Los médicos de Bangalore, el «valle del Silicio» de India, han llevado a cabo observaciones similares. Antiguos alumnos del MIT (Instituto de Tecnología de Massachusetts) han informado de tasas de autismo entre sus hijos diez veces mayores que la media. Desdichadamente, no se han realizado estudios detallados y sistemáticos en Silicon Valley, en Bangalore o en el MIT, por lo que estas observaciones siguen siendo solo anecdóticas.

No obstante, sí he investigado con mis colaboradores las tasas de autismo en Eindhoven, el «valle del Silicio» holandés. Philips ha sido allí, desde 1891, una gran creadora de puestos de trabajo, e IBM tiene una filial en la ciudad. Alrededor del 30 por ciento de los puestos de trabajo de Eindhoven corresponden al sector de las tecnologías de la información. Eindhoven cuenta también con una importante universidad politécnica y alberga el High Tech Campus, un centro para la alta tecnología que viene a ser el homólogo holandés del MIT. Hemos comparado las tasas de autismo en Eindhoven con las de dos ciudades holandesas de tamaño similar: Utrecht y Haarlem.

Solicitamos en 2010 a todas las escuelas de esas tres ciudades que indicasen cuántos de sus alumnos habían recibido un diagnóstico de autismo. Participaron en total 369 escuelas, que aportaron información sobre 62.505 niños. Encontramos que la tasa de autismo en Eindhoven era casi tres veces mayor (229 por 10.000) que en Haarlem (84 por 10.000) o en Utrecht (57 por 10.000).

Quizá coincidan en parte los genes que contribuyen al autismo y los que intervienen en la singular facultad humana de entender con detalle el funcionamiento del mundo, de apreciar belleza en las estructuras inherentes a la naturaleza, de la música o las matemáticas

MENTES MASCULINAS

A la par que comprobamos los vínculos entre el autismo y la tendencia sistematizadora, indagamos por qué el autismo se presenta con mucha mayor frecuencia en los niños que en las niñas. En el autismo clásico, la proporción por sexos es de cuatro niños por cada niña. En el Asperger, puede que sea de hasta nueve niños por cada niña.

Análogamente, una tendencia fuerte a sistematizar es mucho más común en hombres que en mujeres. En la infancia, los niños suelen interesarse más que las niñas por los sistemas mecánicos (vehículos de juguete) o los juegos de construcción (Lego, por ejemplo). En la edad adulta, la presencia masculina es superior a la femenina en la tecnología, la ingeniería, las matemáticas y las ciencias, con la excepción de las ciencias centradas en las personas, como la psicología clínica o la medicina. Hemos estado investigando si la concentración elevada de testosterona en el feto, de la que hace mucho se sabe que interviene en «masculinizar» el desarrollo del cerebro en los animales, guarda correlación con una fuerte tendencia a sistematizar y con otros rasgos asociados al autismo. Un feto masculino humano produce al menos el doble de testosterona que uno femenino.

Para verificar esas ideas, junto con Bonnie Auyeung, del Centro de Investigación del Autismo de Cambridge, estudiamos a 235 embarazadas a quienes se había practicado una amniocentesis, que consiste en tomar mediante una larga aguja muestras del fluido amniótico en el que flota el feto. Observamos que a más testosterona alrededor del feto en el seno materno, mayores eran el posterior interés de los niños por los sistemas, su atención a los detalles y el número de rasgos que presentaban asociados al autismo. Investigadores de Cambridge y de Dinamarca están colaborando ahora para comprobar si los niños que han llegado a manifestar autismo estuvieron expuestos a elevadas concentraciones de testosterona en el seno materno.

Si la testosterona fetal desempeñase un papel importante en el autismo, las mujeres autistas tendrían que estar, en ciertos aspectos, especialmente masculinizadas. Hay indicios de que es así. Las niñas autistas parecen preferir juguetes típicos de niños. En las mujeres con autismo y en sus madres es alta la incidencia del síndrome del ovario poliquístico, causado por un exceso de testosterona y que se caracteriza por ciclos menstruales irregulares, retraso de la entrada en la pubertad e hirsutismo (vello excesivo).

Si la testosterona prenatal interviene en el autismo, no lo hace sola. Se comporta epigenéticamente: modifica la expresión de los genes e interacciona con otras moléculas importantes. Por otra parte, es improbable que el supuesto vínculo del autismo y la sistematización, de ser confirmada por estudios ulteriores, abarque toda la complejidad de la genética del autismo. Y tampoco se ha de extraer la conclusión simplista de que todas las personas con mentalidad técnica son portadoras de genes del autismo.

Investigar por qué ciertos colectivos presentan porcentajes más elevados de autismo y verificar si los genes que contribuyen a este trastorno guardan correlación con genes de la aptitud técnica pudiera ayudarnos a saber por qué se desarrolla a veces el cerebro humano de un modo distinto del habitual. Los autistas, cuya mente difiere de lo que consideramos corriente, a menudo presentan tanto discapacidades como aptitudes excepcionales. Los genes que contribuyen al trastorno quizá coincidan en parte con los genes responsables de la singular cualidad humana de comprender con extraordinario detalle cómo funciona el mundo, de apreciar la belleza de las estructuras inherentes a la naturaleza, la tecnología, la música y las matemáticas.

PARA SABER MÁS

The essential difference: The truth about the male and female brain. Simon Baron-Cohen. Basic Books, 2004. (En español: *La gran diferencia: Cómo son realmente los cerebros de hombres y mujeres*. Amat Editorial, 2005).

Sex differences in the brain: Implications for explaining autism. Simon Baron-Cohen et al. en *Science*, vol. 310, págs. 819-823; 4 de noviembre de 2005.

Autism and Asperger syndrome: The Facts. Simon Baron-Cohen. Oxford University Press, 2008. (En español: *Autismo y síndrome de Asperger*. Alianza Editorial, 2010)

Why are autism spectrum conditions more prevalent in males? Simon Baron-Cohen et al. en *PloS Biology*, vol. 9, n.º 6, art. n.º e1001081; 14 de junio de 2011.

ENERGÍA

Las piezas ausentes del proyecto ITER

En el camino hacia una energía sin límites, el experimento más complejo del mundo se ha topado con varios obstáculos

Geoff Brumfiel





Geoff Brumfiel trabaja como periodista para la revista *Nature*, desde donde lleva más de diez años cubriendo el proyecto ITER.



En un día frío y gris de noviembre de 1985, el entonces presidente de EE.UU., Ronald Reagan, aterrizaba en Ginebra para reunirse con el nuevo líder de la Unión Soviética, Mijaíl Gorbachov. Convencido de que el riesgo de una guerra nuclear entre ambas superpotencias era elevado, Reagan deseaba que ambos países redujeran sus arsenales. Por su parte, Gorbachov también reconocía que la carrera armamentística estaba estrangulando la economía soviética.

El encuentro degeneró con rapidez. Reagan cargó contra el historial de agresiones de la URSS y Gorbachov atacó la Iniciativa de Defensa Estratégica, un ambicioso plan del Gobierno estadounidense para interceptar en pleno vuelo proyectiles nucleares enemigos. Las negociaciones estuvieron a punto de romperse. A las cinco de la madrugada, ambas partes acordaron un comunicado conjunto sin compromisos definidos. Al final, casi a modo de posdata, los líderes incluyeron una vaga mención al compromiso de desarrollar una nueva fuente de energía «para el beneficio de toda la humanidad».

Aquella escueta nota puso en marcha un proyecto que ha terminado convirtiéndose en la que bien podríamos considerar la empresa científica más ambiciosa del siglo xxi: un fárrago tecnológico que, si acaba funcionando como debiera, pondrá punto final a la crisis energética que afronta el planeta.

El proyecto ITER (en su origen, siglas inglesas para Reactor Termonuclear Experimental Internacional) intentará generar energía por medio de los mismos procesos que tienen lugar en el interior del Sol. Producirá unos 500 megavatios, diez veces más que la energía necesaria para ponerlo en funcionamiento, y consumirá casi exclusivamente hidrógeno, el elemento más abundante del universo. El proyecto sentará las bases de una técnica que podría satisfacer la casi insaciable sed de energía que padece nuestro mundo. Los responsables políticos de la Unión Europea y seis países más (EE.UU., Rusia, Japón, China, India y Corea del Sur) se han sumado con entusiasmo a la tarea.

Pero, tal y como sucedió con la cumbre que alumbró la idea, ITER no ha evolucionado a la altura de las expectativas. Las estimaciones de coste se han duplicado una y otra vez, a medida que los problemas técnicos se han venido solucionando con disposiciones burocráticas. En lugar de habilitar un fondo de recursos común, cada uno de los siete miembros produce por separado las piezas que luego habrán de ensamblarse en el sur de Francia, donde se albergará el prototipo; algo parecido a hacer un pedido de tuercas y tornillos de un catálogo para construir un Boeing 747 en el patio trasero de su casa. El proyecto no avanza: hace poco más de un año no había más que un agujero de 17 metros de profundidad, que solo hace poco ha sido rellenado con 110.000 metros cúbicos de hormigón. La fecha de inicio se pospuso de 2016 a 2018. Ahora se sitúa a finales de 2020. Los primeros experimentos de producción de energía no tendrán lugar antes de 2026, veinte años después del inicio de su construcción.

En todo caso, el proyecto ITER no supondrá más que el primer paso en la producción de energía basada en la fusión nuclear. Aunque cumpliera sus objetivos, después habría de venir una nueva generación de prototipos. Y solo cuando estos hayan superado las pruebas podría dar comienzo la construcción de las primeras centrales conectadas a la red. El programa deberá continuar durante décadas, si no siglos.

Sus defensores arguyen que, a largo plazo, ITER constituye la única esperanza de aplacar la demanda de energía mundial. Pero también ellos se han visto obligados a revisar a la baja sus predicciones. El único impulso del proyecto parece provenir ahora de la inercia institucional: cada Gobierno implicado prefiere continuar en él antes que convertirse en el primero en abando-

EN SÍNTESIS

El reactor de fusión ITER promete convertirse en un hito de la producción de energía limpia e ilimitada. Generará diez veces más energía que la necesaria para alimentarlo.

Pese a tales expectativas, el proyecto se encuentra en apuros. Con un sobrecoste de miles de millones y un retraso de varios años, no se espera que comience a operar antes de 2026.

Las dificultades obedecen a motivos complejos, desde problemas técnicos hasta las disputas burocráticas que conlleva una asociación global de siete grandes participantes.

Los críticos arguyen que ITER se ha convertido en un falso espejismo que acabará recibiendo dinero a expensas de otros proyectos en energías limpias, como la eólica o la solar.

PÁGINAS ANTERIORES: SACHIKO AKINAGA (*escultura*) E HIRONOBU MAEDA (*fotografía*)

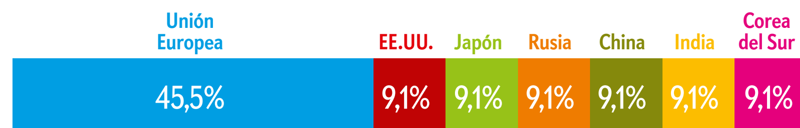
nar el barco. Mientras tanto, los críticos no dejan de ganar argumentos con cada nuevo retraso o sobrecoste. Para muchos, ITER supone un colosal despilfarro en un momento en el que otras áreas de la investigación energética buscan desesperadamente financiación. Unos y otros coinciden en algo: cuando el proyecto finalice, más valdrá que funcione.

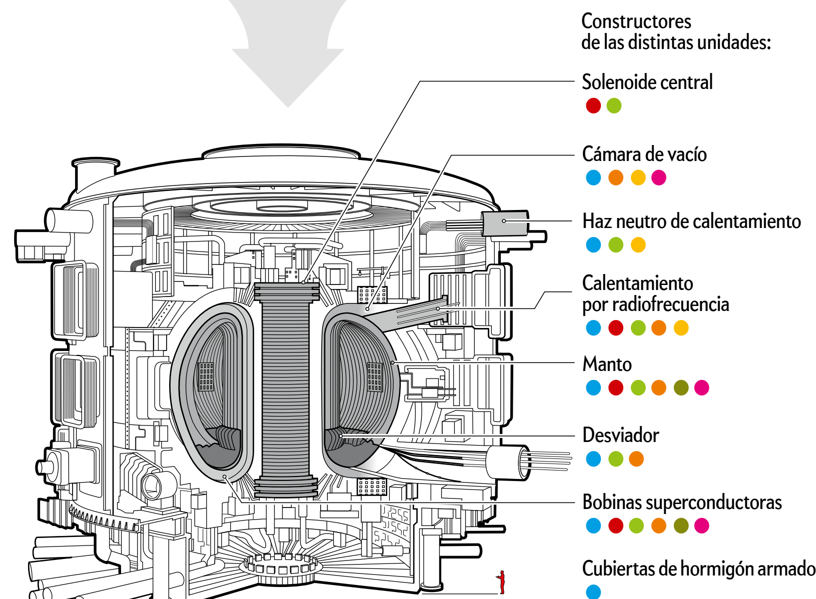
PARTICIPANTES

Reparto de tareas

La construcción de ITER, el mayor reactor de fusión experimental del mundo, corre a cargo de la Unión Europea y seis países más. Cada uno de ellos debe suministrar una parte del equipo y contratar con industrias locales la fabricación de las piezas necesarias. Ello significa que una bobina superconductora podrá provenir de Japón, China o Rusia. Los científicos del proyecto deberán garantizar que todas las unidades funcionen de manera coordinada bajo las extremas condiciones que exige la fusión nuclear.

Contribución relativa a los costes de construcción, estimada en unos 14.000 millones de euros





EL SOL EN UNA BOTELLA

En teoría, la fusión constituye la fuente de energía perfecta. Se basa en la única fórmula de la física de la que todo el mundo ha oído hablar: energía es igual a masa por la velocidad de la luz al cuadrado ($E = mc^2$). Debido al enorme valor de esta constante de la naturaleza, la ecuación implica que una masa ínfima puede generar cantidades descomunales de energía.

Todas las reacciones nucleares obedecen dicha ley. Las centrales nucleares ordinarias fisionan núcleos pesados, como los de uranio, y en el proceso una minúscula cantidad de masa del núcleo original se transforma en energía. La fusión opera a la inversa: cuando dos núcleos de hidrógeno se unen, el resultado es un núcleo de helio, de masa algo inferior a la suma de las masas de sus progenitores. Por unidad de masa, la fusión nuclear puede generar unas tres veces más energía que la fisión. Pero, sobre todo, el hidrógeno abunda mucho más que el uranio, y el helio resultante de la reacción no es radiactivo.

«La fusión es seductora», reconoce Gyung-Su Lee, experto surcoreano que ha invertido años enteros en las negociaciones del proyecto ITER. «Se asemeja a la creación de oro por los alquimistas medievales; es como el santo grial de la energía», explica. Lee cree con firmeza en la fusión. En 1980 llegó a la Universidad de Chicago para estudiar teoría cuántica de campos, una de las ramas más enrevesadas de la física. Pero una vez allí cambió su modo de pensar: «En EE.UU. el dinero lo es todo. La teoría cuántica solo ofrece recompensas intelectuales». Comenzó a buscar un ámbito de estudio más práctico, hasta que se decantó por la fusión nuclear. Reconoce las grandes dificultades científicas e ingenieriles que esta plantea, pero también que su logro supondría una recompensa incalculable: energía abundante a un precio asequible y sin necesidad de combustibles fósiles. El mundo cambiaría por completo.

La fusión ha encandilado a científicos como Lee durante medio siglo. Muchos antes que él dieron por inminente su llegada. Y, aunque entre ellos había algunos charlatanes, la gran mayoría simplemente se equivocó de plano. La naturaleza rompe sus promesas.

El reto fundamental consiste en lo siguiente: para que dos núcleos de hidrógeno se fusionen, deben vencer la repulsión que experimentan las cargas del mismo signo. La estrategia adoptada por ITER consiste en calentar el hidrógeno en un recinto magnético. El dispositivo empleado recibe el nombre de tokamak, una cámara metálica toroidal rodeada por bobinas que generan campos magnéticos. Esos grilletes magnéticos confinan el plasma de iones de hidrógeno mientras este se calienta a millones de grados, una temperatura que ningún material sólido podría resistir.

En los años setenta, los tokamaks parecían tan prometedores que algunos científicos se convencieron de que las primeras centrales de fusión aparecerían a mediados de la década de los noventa. El único reto consistía en aumentar las dimensiones del reactor; en general, cuanto mayor sea el tokamak, más elevadas resultan las temperaturas que puede soportar y más eficiente se torna el proceso de fusión.

Entonces comenzaron a aparecer problemas. El plasma es un medio conductor; como tal, se halla sujeto a la violencia de las corrientes eléctricas que se generan en su seno. La turbulencia puede expulsar el plasma del confinamiento magnético y lanzarlo contra las paredes de la máquina. A medida que se consiguen temperaturas mayores, debe aumentar el tamaño del

FUENTE: ITER, GEORGE RETSECK (*ilustración*)

Apuesta de futuro

Los retos aún pendientes y el coste de inversión del proyecto ITER deben analizarse desde una perspectiva más amplia

JOAQUÍN SÁNCHEZ SANZ

La fusión como fuente de energía presenta importantes ventajas. Utiliza un combustible virtualmente ilimitado, distribuido por todo el planeta y es respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, adolece de un problema fundamental: la gran dificultad técnica para llevar a cabo la reacción, ya que para alcanzar la fusión en condiciones energéticamente rentables, el combustible debe calentarse a una temperatura de doscientos millones de grados.

A pesar de que el progreso hacia dicha meta ha sido sostenido durante los últimos cincuenta años —los avances se han sucedido a un ritmo similar a los de otras disciplinas de gran éxito, como la microelectrónica—, el objetivo aún se antoja distante. Ello ha provocado que, en ocasiones, la energía de fusión se considere una quimera inalcanzable. Sin embargo, esta técnica «de ciencia ficción» comienza a hacerse realidad. El encargado de demostrarlo será el experimento ITER, el cual se propone generar, a partir de la fusión de isótopos de hidrógeno, una energía diez veces mayor que la necesaria para calentar el combustible.

La construcción de ITER no resulta una empresa sencilla. Su gran tamaño, necesario para alcanzar la rentabilidad energética, y su complejidad técnica, probablemente sin precedentes en la historia de la humanidad, implican un gran coste de construcción. Su presupuesto se estima en unos 14.000 millones de euros repartidos en diez años. Aunque se trata de una cifra impresionante que en ocasiones ha despertado críticas y suspicacias, en realidad supone una parte casi insignificante de los costes asociados al consumo de energía. Construido por un consorcio de países que albergan a más de la mitad de la población del planeta, ITER costará en diez años casi lo mismo que el consumo mundial de petróleo de dos días (85 millones de barriles diarios, a 100 dólares por barril). Esta inversión, que implica además un importante desarrollo tecnológico, tampoco representa una amenaza para el desarrollo de otras fuentes de energía. A modo de ejemplo, baste señalar que España dedica cada año a las energías renovables una cantidad de dinero cien veces mayor que la que, a través del presupuesto de la UE, invierte en el proyecto ITER.



Inicio de los trabajos de cimentación en agosto de 2011. El reactor de fusión ITER será construido en el complejo de Cadarache, a unos 60 kilómetros de Marsella.

CORTESÍA DE LA ORGANIZACIÓN ITER

En contra de lo que podrían indicar algunos estereotipos, España desempeña un papel de vanguardia en el proyecto ITER. Barcelona alberga la sede de Fusion For Energy, la entidad encargada de coordinar las contribuciones europeas al proyecto, un centro en el que trabajan 300 ingenieros, científicos y personal de gestión, y que supone una inyección de 30 millones de euros anuales a la economía de la ciudad. La industria española cuenta además con una gran participación en los contratos de construcción del reactor: ocupa el tercer lugar europeo por volumen de las adjudicaciones, solo por detrás de Francia e Italia. Entre los contratos asignados, que en la actualidad suman más de 200 millones de euros, cabe señalar la construcción de diez grandes imanes superconductores, el auténtico corazón técnico de ITER, cuya coordinación corre a cargo de una empresa española.

Pese a la sucesión de retrasos y dificultades, ITER empieza a mostrar signos de progreso. El 25 por ciento del cable superconductor de niobio y titanio, y el 75 por ciento del de niobio y estaño (el más crítico en su producción) ya han sido fabricados. También ha habido avances en la construcción de la vasija de vacío, otro de los grandes componentes, así como resultados satisfactorios en las pruebas de viabilidad de los sistemas aún pendientes. En paralelo, ITER ha ido incorporando nuevos resultados obtenidos en experimentos a lo largo de todo el mundo. Como ejemplos, cabe citar las bobinas de campo resonante desarrolladas en San Diego y Garching, cuyo objetivo consistirá en reducir la carga térmica de las paredes, o el empleo de tungsteno como pared en la zona de contacto con el fluido a altas temperaturas. Esto último ha permitido modificar el plan inicial de utilizar material compuesto de fibra de carbono; una decisión que ha tomado cuerpo tras los exitosos experimentos con tungsteno realizados en los laboratorios de Garching y Culham (Reino Unido).

El programa que propone ITER plantea sin duda grandes desafíos técnicos y organizativos, los cuales derivan de la decisión de los socios de construirlo con aportaciones en especie. Con todo, podemos afirmar que el proyecto se está consolidando y que cumplirá sus objetivos.

Sin duda, aún queda un largo camino por recorrer. Convertir un prototipo de extrema complejidad científica y técnica en un dispositivo comercialmente rentable, capaz de operar sin paradas durante meses y con su propio ciclo regenerador de tritio (algo que ITER aún no hará) puede parecer casi imposible. Pero, desde luego, tampoco los ingenieros que concibieron los primeros automóviles y aeroplanos llegaron nunca a imaginar que, en un futuro, se fabricarían coches que recorrerían veinte mil kilómetros sin tener que levantar la tapa del motor o que existirían aviones con capacidad para transportar, de manera económicamente rentable y con total seguridad, a más de cuatrocientas personas.

Joaquín Sánchez Sanz es director del Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT y presidente del comité asesor científico y técnico del proyecto ITER.



Cimientos sólidos: El reactor se asentará sobre 493 columnas en soportes de acero y caucho para aislar sus 400.000 toneladas de las vibraciones sísmicas.

CORTESÍA DE LA ORGANIZACIÓN ITER

tokamak y la intensidad de los campos magnéticos, lo cual implica un incremento de la corriente eléctrica que circula por las bobinas. Dicho de manera simple, cuanto mayor y más potente sea la máquina, más energía necesitará consumir para que todo se mantenga en su sitio.

De lo anterior se desprende que un tokamak tradicional nunca generará más energía que la que consume. Lee y otros expertos solo veían una solución: usar superconductores, materiales que cuando se enfrían a temperaturas extremadamente bajas dejan de oponer resistencia al paso de la electricidad. Si se empleasen imanes superconductores, podrían bombearse con corriente y dejarse funcionar de manera indefinida. Ello resolvería el problema energético, pero a un alto precio: los superconductores son materiales exóticos y muy caros, cuyo funcionamiento exige mantenerlos a unos cuatro grados Kelvin (poco más del cero absoluto) con helio líquido.

Ya en 1985 parecía evidente que ni la Unión Soviética ni EE.UU. podían construir un tokamak lo bastante grande como para obtener energía neta. En sus inicios, ITER era un proyecto conjunto de EE.UU., la URSS, Japón y Europa. Hacía gala de un diseño impresionante basado en la tecnología más reciente: además de superconductores, incorporaba un avanzado sistema de inyección de átomos neutros, así como complejas antenas de ondas electromagnéticas para calentar el plasma. Como combustible, en lugar de emplear hidrógeno común ITER usaría deuterio y tritio, dos isótopos que se fusionan a presiones y temperaturas más bajas. El deuterio abunda (una gota de agua de mar contiene billones de átomos de deuterio), pero el tritio es exótico, radiactivo y caro. Los costes de construcción se estimaron en un principio en unos 5000 millones de dólares. A mediados de los años noventa, sin embargo, una evaluación más exhaustiva duplicó el presupuesto. En 1998, EE.UU. abandonaba el proyecto debido, en parte, a la magnitud del gasto.

Poco tiempo después, un pequeño grupo empeñado en mantener viva la idea acometió un rediseño que reducía a la mitad el tamaño y el coste. Por desgracia, la premura para presentarlo hizo «olvidar algunas cosas», confiesa Gunther Janeschitz, científico veterano de la organización ITER y miembro del equipo original que elaboró el rediseño. Los Estados miembros se disputaron las grandes unidades de la máquina, pero hubo piezas menores (conductos de paso, conexiones) cuya construcción nunca se asignó a nadie. «Algunos huecos entre componentes no quedaban descritos en ninguna de las especificaciones», reconoce Janeschitz.

Tales omisiones suponen un azote para el programa, puesto que el reactor no lo fabrica la propia organización ITER. Los miembros veteranos, como Rusia y Japón, quieren que sus inversiones recalen en los laboratorios de sus respectivos países, mientras que las naciones recién llegadas, como India o China, desean dar a su floreciente industria la oportunidad de aprender nuevas técnicas. Así pues, cada Estado suministra unidades ya acabadas (amén de una pequeña contribución financiera a la organización central). Los cables superconductores de las bobinas llegarán de Hitachi, en Japón, pero también de la empresa china Western Superconducting Technologies Company y del Instituto Efremov de Investigaciones Científicas sobre Aparatos Electrofísicos, en Rusia. La gigantesca cámara de vacío será construida en Europa, India, Corea y Rusia, y los sistemas de calentamiento vendrán de Europa, Japón, India y EE.UU., país que se reincorporó al proyecto en 2003. Después, la organización central ITER reunirá las piezas, intentará determinar lo que falta y las ensamblará para levantar el experimento más complejo jamás construido.

El desafío se hace palpable desde un castillo medieval con vistas al río Durance, separado de la sede temporal de la organización ITER por una autovía de dos carriles. Sus miembros se reúnen en una sala que ha sido dispuesta a tal efecto con una gran cantidad de micrófonos y pantallas planas. Aunque no muestran ningún interés en que un periodista asista a las negociaciones, en una pausa para tomar café Lee me informa sobre el estallido de una pequeña crisis: «Los indios opinan que un conducto debería terminar aquí y el resto cree que debería ir hasta allá», explica apuntando a extremos opuestos de la sala. «La solución obvia sería decantarse por el punto medio, pero algo así no resulta técnicamente posible. Así que tenemos que recurrir al DG.»

Hasta 2010, el «DG», o director general, era un soporífero diplomático japonés llamado Kaname Ikeda. Cuando tales problemas comenzaron a subir de tono, Ikeda dimitió presionado por el consejo de ITER y fue sustituido por Osamu Motojima, un avezado experto en fusión japonés cuya naturaleza tranquila encubre una personalidad que, quienes lo conocen, describen como severa y en ocasiones despótica. Motojima y sus delegados, veteranos de los programas estadounidense y europeo, se sientan en unas caballerizas reformadas, próximas a la sala de conferencias, para intentar llegar a un acuerdo con el equipo indio. Mientras discuten, Harry Tuinder, por entonces asesor jefe de ITER para temas legales (luego dejaría la organización para incorporarse a la Comisión Europea), fuma un cigarrillo en el patio. Le pregunto si no sería mejor que Motojima gozase de la autoridad necesaria para obligar a cada uno a aportar las piezas necesarias. «Eso supondría degradar la clase de relaciones

que estamos intentando consolidar», responde. Al final, será la participación voluntaria de los miembros de ITER, no la autoridad de su director general, lo que cohesionará el proyecto.

UN LARGO CAMINO POR RECORRER

Mientras las negociaciones parecen no acabar nunca, la estimación de costes ha vuelto a duplicarse, hasta alcanzar los 20.000 millones de dólares, si bien puede que, debido a su construcción descentralizada, el coste real del proyecto no llegue a conocerse jamás. La fecha de finalización ha vuelto a postergarse otro par de años.

El desmesurado encarecimiento y la acumulación de retrasos han dado alas a los opositores del tokamak gigante. Sobre todo en Europa, que financia el 45 por ciento de la construcción. «Si de veras deseamos invertir para salvar el clima y conseguir la autonomía energética, es obvio que el experimento carece de sentido», opina Michel Raquet, asesor en temas energéticos del Partido Verde en el Parlamento Europeo. En estos momentos, la Unión Europea trabaja en unos presupuestos que pretenden cubrir los 2700 millones de euros que ITER necesita para que la construcción del reactor finalice en 2020. El Partido Verde, principal adversario del proyecto en Europa, teme que ese dinero llegue a expensas de las energías renovables, como la eólica o la solar.

Un pequeño grupo empeñado en mantener viva la idea acometió un rediseño que reducía a la mitad el tamaño y el coste. Por desgracia, la premura para presentarlo hizo «olvidar algunas cosas»

En EE.UU., que financia solo un 9 por ciento, la oposición se encuentra más calmada. Para Thomas Cochran, defensor de la energía nuclear en el Consejo de Defensa de los Recursos Naturales, ITER no supone una amenaza, sino «un simple despilfarro». Asegura que el mundo debería dedicarse a luchar contra otros programas de investigación nuclear que generan residuos de larga duración o que permiten la difusión de técnicas militares. También el Congreso de EE.UU. se muestra indiferente ante el programa. «Solo puedo decir que no se prevé ninguna acción para abortarlo», informa Stephen Dean, presidente de Fusion Power Associates, una fundación que aboga por el desarrollo de la fusión nuclear. Pero puede que la situación cambie. El último presupuesto estadounidense contemplaba un aumento considerable en la financiación de ITER a costa de recortes en proyectos nacionales sobre fusión. Aun así, los 150 millones de dólares que recibirá ITER de EE.UU. implican un 25 por ciento de rebaja sobre la contribución prometida.

También otros países tropiezan con obstáculos para cumplir sus compromisos. India ha intentado repartir contratos, y algunas de las instalaciones japonesas esenciales para el proyecto resultaron dañadas en el devastador terremoto que asoló el país en marzo de 2011. «Cada nación tiene sus propios motivos para retrasarse», lamenta Vladimir Vlasenkov, miembro de la delegación rusa, al tiempo que se apresura a añadir que Rusia va por el mismo camino.

El proyecto ITER demostrará si la fusión nuclear es factible o no, pero no si resultará comercialmente viable. Y existen buenas razones para pensar que podría no serlo. En términos simples, la radiación que se genera en el proceso es muy intensa y dañina para los materiales ordinarios, como el acero. Una futura central debería incorporar materiales, aún por desarrollar, que fueran capaces de resistir durante años el bombardeo del plasma; de lo contrario, el reactor sufriría continuas paradas de servicio. Otro problema reside en el empleo de tritio como combustible, el cual habría de producirse in situ, probablemente aprovechando la radiación del reactor.

El mayor obstáculo para construir un reactor de fusión termonuclear basado en diseño de ITER tal vez consista en su extrema complejidad. Los sistemas de calentamiento y el resto de las piezas podrán resultar adecuados para el experimento, pero una central comercial debería ser mucho más simple, sostiene Steve Cowley, director ejecutivo de la Agencia de Energía Atómica del Reino Unido: «No cabe imaginar una máquina que produzca energía un día sí y otro también con todos esos refinamientos técnicos», asegura. Antes de suministrar energía a la red eléctrica habrá que construir otra generación de reactores piloto, muy costosos. Dado el lento desarrollo de ITER, ninguno de esos reactores estará instalado y en servicio antes de mediados de siglo.

Pese a todas las trabas, y a pesar de la incertidumbre general que envuelve el futuro de la fusión nuclear, resulta difícil encontrar a alguien familiar con ITER que piense que el reactor no llegará a construirse. La presión de los demás participantes constituye uno de los motivos: «Francia está por la labor y no se retirará, porque EE.UU. también lo está y tampoco ellos van a echarse para atrás», explica Cochran. Tuinder observa que la visibilidad política de los países implicados, unida a las fuertes penalizaciones asociadas a un abandono temprano, sirve para mantener vivo el proyecto.

Dejando a un lado esas razones para continuar con el programa —legítimas, aunque algo cínicas—, numerosos científicos se hallan convencidos de que la fusión constituye la única esperanza para satisfacer la demanda mundial de energía. «El futuro energético del planeta me provocaba pánico», confiesa Raymond Orbach, científico jefe del Departamento de Energía cuando EE.UU. se reincorporó al proyecto. «[La fusión] no emite CO_2, es básicamente ilimitada y no provoca ningún impacto ambiental. Encuentre una alternativa», concluye. La mayoría de los expertos en fusión, sin embargo, cree que la crisis climática es inevitable. Cowley advierte que, una vez que la humanidad haya aprendido la lección, más le valdrá tener listas un par de soluciones técnicas. Según esta manera de razonar, la fusión funcionará porque no quedará más remedio.

PARA SABER MÁS

El reactor termonuclear experimental internacional. Robert W. Conn et al. en *Investigación y Ciencia*, n.º 189, págs. 56-63, junio de 1992.

Fusion energy: Just around the corner. Geoff Brumfiel en *Nature*, vol. 436, págs. 318-320, 21 de julio de 2005.

Sun in a bottle: The strange history of fusion and the science of wishful thinking. Charles Seife. Viking, 2008.

Fusion as an energy source: Challenges and opportunities. W. J. Nuttall. Informe del Instituto de Física británico, septiembre de 2008.

Las dificultades de la fusión nuclear. Michael Moyer en *Investigación y Ciencia*, n.º 404, págs. 28-35, mayo de 2010.

Organización ITER: **www.iter.org**

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Cuando el vidrio fluye

¿Es el vidrio un auténtico sólido? No, pero su elevada viscosidad evita que percibamos fluencia alguna, ni siquiera a lo largo de varios siglos

Al enfriarse, no todos los materiales pasan inmediatamente del estado líquido al sólido. El alquitrán y el vidrio, por ejemplo, se tornan pastosos y fluyen cada vez más despacio conforme su temperatura disminuye. ¿Qué estado caracteriza a tales materiales a temperatura ambiente? Un experimento que comenzó en 1927 ha demostrado que el alquitrán fluye, si bien con gran lentitud. Y según una idea otra vez en boga, lo mismo ocurriría con el vidrio: fe de ello darían las vidrieras de las catedrales a lo largo de los siglos. Pero ¿es realmente el caso?

En un principio, la distinción entre un sólido y un líquido no plantea ningún problema: el primero conserva siempre su geometría, mientras que el segundo fluye y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Por lo general, no nos resultará nada difícil distinguir entre uno y otro. Pero ¿qué ocurre con una gelatina o con un camembert bien cremoso? En un primer momento quizá tendiésemos a clasificarlos dentro de la vaga categoría de las sustancias blandas; esto es, aquellas que solo se deforman por acción de un esfuerzo. Sin embargo, tras una noche a temperatura ambiente, el cubo de gelatina conservará su forma cúbica, mientras que el camembert se habrá convertido en una masa informe. Parecería, pues, que la gelatina es sólida, pero no así el camembert; al menos, en la escala de tiempo de una noche.

Que en un principio no hayamos clasificado el camembert como fluido se debe a que el tiempo que tarda en fluir resulta mucho mayor que el que requieren el agua o la miel. Ese tiempo es, de hecho, proporcional a la viscosidad del fluido (una magnitud que mide su resistencia a fluir) e inversamente proporcional a su densidad.

Una gota cada ocho años

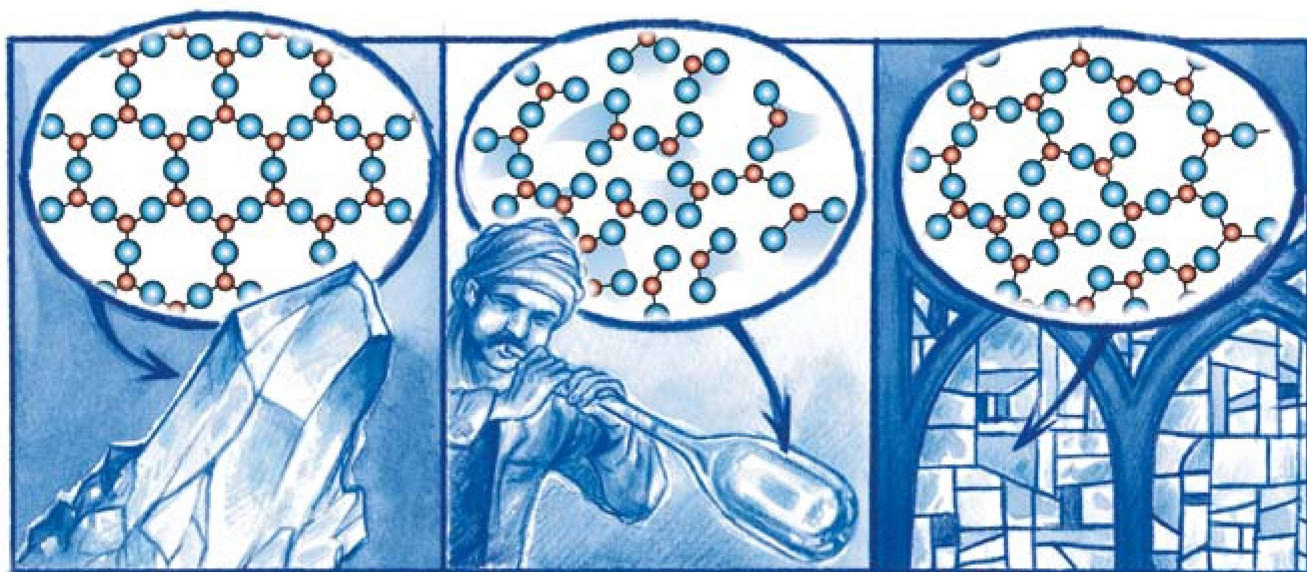
Si la viscosidad del agua asciende a un centipoise, la de la miel llega a los 5000 centipoises y la del camembert, a 50 millones. Poco familiarizados con estas unidades, podemos comparar las cifras asociadas a dos sustancias de densidades similares: si la miel tarda 10 segundos en fluir, el camembert necesitará unos 100.000 segundos; es decir, más de un día.

Los ejemplos anteriores muestran que la fluidez guarda relación con una escala de tiempos. Un caso asombroso lo hallamos en el alquitrán: parece sólido y quebradizo en experimentos cortos; pero, en realidad, fluye. En 1927, Thomas Parnell, de la Universidad de Queensland, puso en marcha el que acabaría convirtiéndose en el experimento de física más largo de la historia. En un embudo cuyo orificio se encontraba cerrado vertió alquitrán fundido. Tras aguardar tres años a que el alquitrán se enfriase del todo, lo abrió de nuevo. La primera gota cayó en 1938, y desde entonces se observa que el alquitrán fluye a la pasmosa velocidad de una gota cada ocho años. Hoy, la cantidad de



La alta viscosidad de la miel no impide que esta fluya, como todos podemos percibir. También el alquitrán fluye a temperatura ambiente. Sin embargo, lo hace de manera casi inapreciable. En un experimento que comenzó en 1927 (*derecha*), solo ocho gotas de alquitrán traspasaron el cuello de un embudo.

BRUNO VACARO



En el silicio cristalino, las moléculas (SiO_2) se disponen de manera ordenada (*izquierda*). En estado líquido tenemos vidrio fundido: las moléculas pueden desplazarse libremente, por lo que no ocupan posiciones fijas (*centro*). Al enfriarse, el vidrio se solidifica: se establecen enlaces intermoleculares y las moléculas quedan fijas en una estructura desordenada (*derecha*).

alquitrán que aún resta basta para que el experimento se prolongue durante otros cien años. Suponiendo que el alquitrán fluya por el embudo del mismo modo que lo haría el agua, su viscosidad se estima en 20.000 millones de centipoises.

Tales órdenes de magnitud implican una dificultad a la hora de definir la fluidez: ¿qué sucede cuando el tiempo que un material necesita para fluir va más allá de la historia de la humanidad y adquiere proporciones geológicas? Semejante caso lo hallamos en el vidrio.

Prestemos primero atención a lo que ocurre cuando un material se enfría. A una temperatura lo suficientemente elevada, su estado es líquido: las moléculas se mueven sin cesar e impiden la aparición de una estructura ordenada. Conforme desciende la temperatura, las moléculas pierden energía cinética y sus interacciones mutuas van frenando poco a poco sus desplazamientos relativos. Cuando ello ocurre, notamos un aumento apreciable de la viscosidad; en el caso del agua, esta se sextuplica entre los 100 y los 0 grados centígrados.

En los cuerpos cristalinos existe una temperatura muy bien definida: la temperatura de solidificación (o de fusión), aquella para la cual las moléculas quedan inmovilizadas en una red periódica. El único movimiento que sobrevive consiste en una pequeña oscilación periódica en torno a sus posiciones de equilibrio. El material se convierte entonces en un sólido y la noción de viscosidad pierde sentido.

Física en la catedral

No es tal caso de la mayoría de los vidrios, cuya viscosidad aumenta de manera asombrosa cuando su temperatura varía en apenas unos cientos de grados. Consideremos un vidrio comercial. A 1000 grados centígrados su viscosidad asciende a un millón de centipoises, lo suficiente como para poder soplarlo y labrarlo. Hacia los 700 grados ese valor se multiplica por 4000; ello no impide, sin embargo, observar deformaciones causadas por su propio peso. A 550 grados, la viscosidad aumenta hasta los mil billones de centipoises, 50.000 veces más que la del alquitrán.

Por convenio, ese valor de la viscosidad define la temperatura de transición vítrea: la disposición de las moléculas se asemeja a la de un líquido (desordenada), pero estas se encuentran casi inmóviles. La estructura del vidrio se nos aparece entonces como la de un líquido coagulado; al menos, durante algunos miles de años. Para temperaturas aún menores, como la ambiente, el vidrio se encuentra en un estado de la materia denominado sólido amorfo.

Aunque la física de la transición vítrea no está en absoluto clara, lo que ya sabemos basta para poner fin a cierto mito. En algunas obras de divulgación puede leerse que el vidrio a temperatura ambiente aún fluye. Prueba de ello serían los vitrales de las iglesias y catedrales medievales: estos se muestran más gruesos en la base que en la cúspide, lo cual se debería a una supuesta fluencia del vidrio a lo largo de los siglos, por acción de la gravedad. Por desgracia, un estudio pausado muestra que tal no puede ser el caso. (Y ello sin recurrir a ejemplos de la vidriería romana —como la vasija de Portland, en el Museo Británico, tan delicada como hace 2000 años— y sin mencionar el hecho de que la altura de los vitrales sacros no varía.)

La temperatura a la cual habría que calentar un vitral para conseguir una fluencia perceptible al cabo de 1000 años puede calcularse con facilidad. El resultado ronda los 400 grados centígrados. El valor efectivo de la viscosidad puede obtenerse extrapolando a la temperatura ambiente la dependencia de la viscosidad con respecto a la temperatura (ya que a temperatura ambiente, la viscosidad del vidrio —si es que tal concepto tiene sentido— no puede medirse de manera directa). Al hacerlo, hallamos valores del orden de 10^{22} centipoises. A estos corresponde un tiempo de fluencia característico de unos 10.000 millones de años, casi tanto como la edad del universo.

En realidad, los antiguos maestros vidrieros no disponían de métodos para fabricar vidrios tan planos y lisos como los de hoy. Por tanto, a fin de asegurarlos con más firmeza, habrían optado por instalar los vitrales con la parte más gruesa abajo y con la parte más fina arriba. Algo que no escribieron en negro sobre blanco.

PARA SABER MÁS

Do cathedral glass flow? E. D. Zanotto en *American Journal of Physics*, vol. 66, págs. 392-395, 1998.
The pitch drop experiment. R. Edgeworth et al. en *European Journal of Physics*, vol. 5, págs. 198-200, 2004.

BRUNO VACARO

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



Riesgos del razonamiento intuitivo

¿Cómo razona usted?

Ninguno de los siguientes problemas requiere un gran esfuerzo. Aunque se trata de ejercicios que pueden resolverse con papel y lápiz sin ninguna dificultad, merece la pena intentar solucionarlos mentalmente. Si puede, anote su respuesta en un papel para comprobarla después.

1. Forma usted parte de un grupo de 100 personas que van a elegir de manera independiente un número entre el 0 y el 100. El ganador será aquel que más se aproxime, sin sobrepasarlo, a 2/3 de la media de todos los números escogidos. Podemos suponer que las otras 99 personas actuarán de modo completamente racional. ¿Qué número debería elegir usted para ganar?
2. Nos encontramos delante de veinte interruptores de idéntica apariencia. Diez de ellos —desconocemos cuáles— encienden sendas bombillas en la habitación de la izquierda, mientras que los diez restantes encienden diez bombillas en la habitación de la derecha. ¿Cuántos interruptores deberemos pulsar para tener la certeza de que hemos encendido al menos dos bombillas en una de las habitaciones contiguas?
3. He comprado un lápiz y una goma de borrar por un total de 1,10 euros. El lápiz ha costado un euro más que la goma. ¿Cuánto he pagado por la goma?
4. Un nenúfar dobla su tamaño cada día. Si tardó 48 días en cubrir por completo el estanque, ¿cuántos días le llevó ocupar la mitad del estanque?
5. Cinco máquinas necesitan cinco minutos para fabricar cinco tuercas. ¿Cuánto tiempo tardarán 100 máquinas en fabricar 100 tuercas?

Comencemos por el primer problema. ¿Eligió un número cercano a 30? En ese caso no se encontrará usted solo, pues se trata de una respuesta bastante intuitiva. Si no disponemos de más información, podemos pensar que la media de los cien números se acercará a 50, cuyas dos terceras partes se aproximan a 33. Sin embargo, obtendremos una respuesta muy diferente en cuanto nos detengamos a reflexionar sobre el problema.

La primera observación relevante es la siguiente: si las 99 personas restantes escogieran el número 100, usted debería intentar no sobrepasar los 2/3 de dicha cantidad, lo que le conduciría a decantarse por el número 66. Pero, dado que el resto de las personas concluirá lo mismo, parece claro que ninguna de ellas elegirá un número mayor que 66. Pero, en ese caso, no debería decidirse por ningún número que sobrepasase 2/3 de 66; es decir, 44. Ahora, si todos los integrantes del grupo razonan del mismo modo, ninguno de ellos elegirá un número mayor de 44. Si iteramos el razonamiento, veremos que, bajo el supuesto de que todo el mundo se comporta de manera completamente racional, todos deberíamos escoger el número 0.

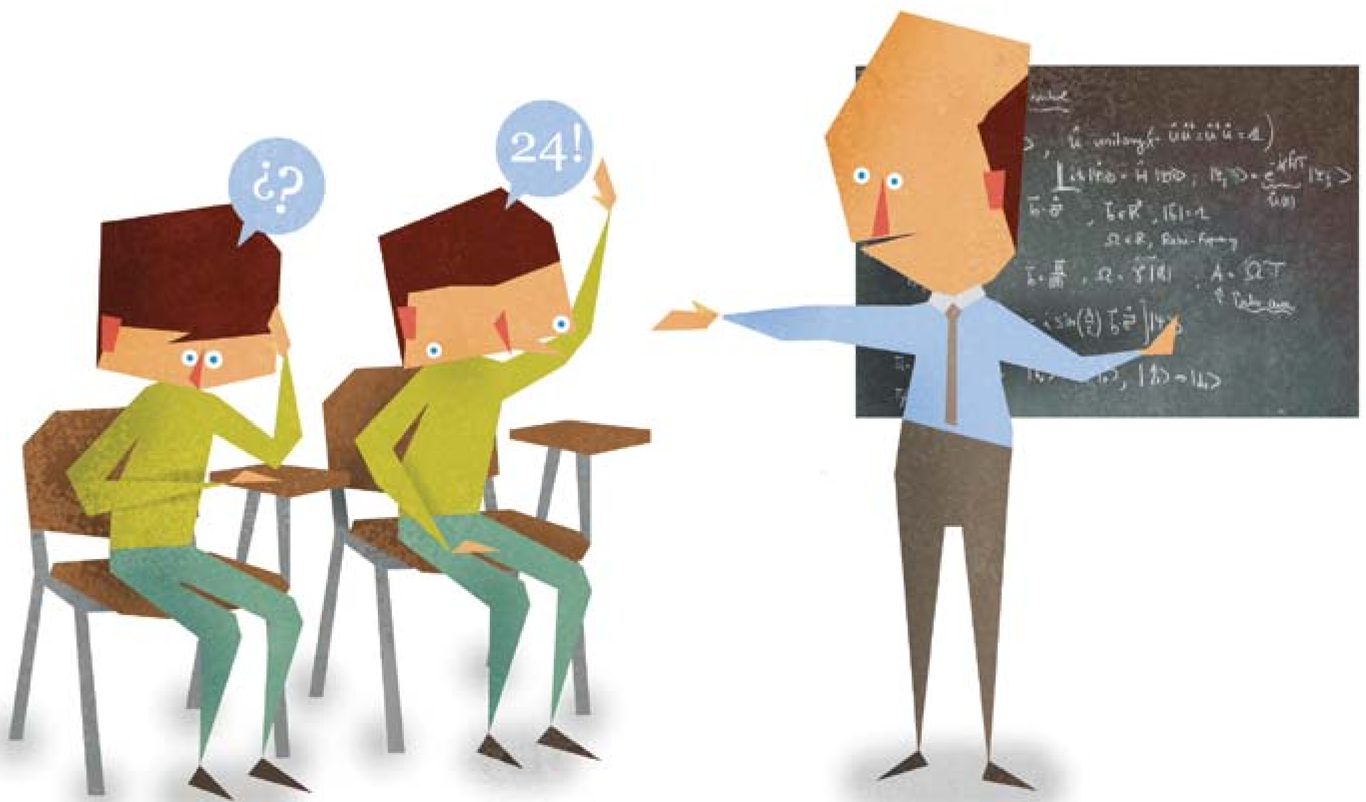
Curiosamente, el supuesto de que todo el mundo tomará su decisión de forma racional es uno que, por lo general, no se cumple. Existen estudios experimentales que muestran que, a la hora de la verdad, la mayoría de los participantes en este juego tiende a escoger números muy superiores a 0.

Vayamos con el segundo problema. ¿Respondió 11 interruptores? ¿O tal vez 12? Es cierto que no podemos tener la certeza de haber encendido al menos una bombilla en cada habitación si no pulsamos 11 interruptores: al fin y al cabo, los 10 primeros siempre podrían corresponder a una misma habitación. Por otra parte, si el objetivo consistiese en encender 2 bombillas en la habitación de la izquierda, podríamos tener que pulsar hasta 12 interruptores; de otro modo, siempre existiría la posibilidad de haber encendido una bombilla en la habitación de la izquierda y 10 en la de la derecha. El razonamiento sería idéntico si deseásemos encender 2 bombillas en la habitación de la derecha.

Aunque tal vez ambas respuestas resulten intuitivas, ninguna de ellas es la correcta. El problema no preguntaba cuántos interruptores deberíamos accionar para encender al menos una bombilla en cada habitación, ni cuántos para estar seguros de haber encendido dos bombillas en la habitación de la izquierda o en la de la derecha. En realidad, basta con pulsar tres interruptores para asegurarnos de que hemos encendido dos bombillas en alguna de las habitaciones. Ignoraremos de cuál de ellas se trata, pero tres interruptores siempre encenderán tres bombillas, dos de las cuales han de hallarse por fuerza en una misma habitación.

Evaluar el instinto

Los últimos tres problemas forman parte de un test diseñado por Shane Frederick, profesor de mercadotecnia en la Universidad Yale. Su objetivo no consiste en medir la habilidad lógica o matemática de un sujeto, sino más bien averiguar qué tipo de razonamiento tiende a emplear una persona al enfrentarse a un problema. Según psicólogos tan influyentes como Daniel Kahneman, premio nóbel de economía en 2002, existen dos tipos de procesos cognitivos. Uno de ellos es casi instantáneo e involuntario, y apenas requiere atención o deliberación; el otro exige mucha más atención y conlleva cierto grado de computación y reflexión.



DANIEL UZQUIANO

Aunque, por lo general, todos nosotros tendemos a considerarnos personas racionales que emplean el segundo tipo de proceso, utilizamos el primer tipo de razonamiento mucho más habitualmente de lo que estaríamos dispuestos a admitir. El primer tipo de razonamiento, que podemos denominar intuitivo, es el que nos lleva a responder de manera incorrecta en problemas como los anteriores. El segundo es al que debemos recurrir para percatarnos de que la respuesta intuitiva era incorrecta.

¿Respondió 10 céntimos, 24 días y 100 minutos a las tres últimas preguntas? Esas son las tres respuestas intuitivas —pero erróneas— que nos vienen a la mente cuando oímos los problemas por primera vez. Si lo hizo, no se preocupe: cuando Frederick realizó el test a más de 3000 estudiantes de ocho instituciones estadounidenses de primera línea, como Harvard, el MIT o Princeton, más de la mitad de los estudiantes erraron. Al investigador le interesaba saber si existía alguna relación entre las respuestas de un individuo y el grado de riesgo que estaba dispuesto a asumir a la hora de tomar una decisión. Frederick observó una correlación entre aquellos participantes que tendían a razonar de manera más reflexiva (los que respondían con acierto a los tres problemas) y aquellos que preferían asumir riesgos mayores en sus decisiones.

El fenómeno parece innegable. Existen problemas que, al oírlos por primera vez, evocan una primera respuesta intuitiva. Aunque muchos de nosotros —si no la mayoría— tendemos a dar por buena esa primera respuesta, hay personas que logran reprimirla y proceden a razonar con mayor detenimiento.

¿Qué hace que una respuesta venga de inmediato a la mente? Frederick no aborda esa cuestión. Quizás al oír el tercer problema por primera vez prestamos atención a las cifras 1,10 y 1, que inmediatamente sugieren 0,10 como respuesta. Sin embargo, como puede comprobarse con facilidad, si por el lápiz pagué un euro más que por la goma, esta no pudo sino costarme 5 céntimos, y aquel, 1,05 euros.

El enunciado del cuarto problema menciona la cifra 48 y la palabra «mitad», lo que de manera inconsciente nos hace pensar en el número 24 (la mitad de 48). Sin embargo, la respuesta correcta es 47: si el nenúfar cubrió por completo el estanque el día 48 después de doblar el tamaño que tenía el día 47, entonces ese día debía ocupar ya la mitad del estanque.

Por último, al oír el número 5 en tres ocasiones diferentes, podemos pensar de manera inconsciente que, al variar dos de los parámetros de 5 a 100, lo mismo debería ocurrir con el tercero, lo cual nos impulsa a contestar «100 minutos». En tal caso, habremos errado de nuevo. Al multiplicar el número de máquinas, también multiplicamos el número de tuercas que estas pueden fabricar en los mismos 5 minutos. La respuesta correcta es 5 minutos.

Parece claro que muchos de nosotros utilizamos el razonamiento intuitivo más a menudo de lo que estamos dispuestos a reconocer. Tal vez la lección que debamos extraer de los problemas anteriores sea que, a la hora de enfrentarnos a cuestiones importantes, deberíamos reprimir nuestro instinto y reflexionar sobre si la primera respuesta que se nos ocurre es la correcta.

PARA SABER MÁS

Rosemarie Nagel describe resultados experimentales relacionados con el primer problema en **A Keynesian beauty contest in the classroom,** *Classroom Expernomics*, vol. 8, otoño de 1999. Disponible en **www.marietta.edu/~delemeeg/expernom/f99.html#nagel**

Daniel Kahneman expone el contraste entre los dos tipos de procesos cognitivos en **Pensar rápido, pensar despacio** (Debate, 2012).



MATERIA. XIII COLLOQUIO INTERNAZIONALE ROMA 7-8-9 GENNAIO 2010.

Actas dirigidas por Delfina Giovannozzi y Mario Veneziani. Leo S. Olschki Editore, Florencia, 2011.

Física prenewtoniana

El concepto de materia hasta la Revolución Científica

El xiii Colloquio Internazionale del Lessico Intellettuale Europeo dedicado a *Materia* se celebró del 7 al 9 de enero de 2010 en la Universidad de Roma. De acuerdo con una tradición que se remonta a 1976, el instituto organiza con cadencia trienal encuentros internacionales en torno a una palabra clave de la tradición filosófica y científica occidental (*Experientia, Ratio, Machina, Natura*, etcétera). En esta ocasión se ha indagado la polisemia del término *materia*, concepto clave en la ciencia y la filosofía occidental hasta el advenimiento de la Revolución Científica. Se va repasando con mirada crítica el desarrollo de esa idea desde el pensamiento griego hasta Newton, pasando por el helenismo, el gnosticismo, la filosofía cristiana, el mundo medieval y el Renacimiento. No solo. El lector se hallará con valiosas aportaciones de Galileo, Descartes, Gassendi, Spinoza, Leibniz o el propio Newton, con ramalazos finales en la ilustración francesa, kantismo y filosofía de la naturaleza de Schelling y Hegel.

El término procede del latín *materia*, cuya raíz difiere de la del término filosófico griego *hyle*, que se supone traduce. Por su etimología remite a la sustancia de la que está hecha la *mater*, es decir, el tronco de árbol, considerado matriz generadora de retoños y, además, material de construcción. Platón, que emplea la palabra *khora*, solo utiliza el término *hyle* en su sentido de madera de construcción. Es Aristóteles quien impone el uso de *hyle* en el sentido filosófico que se vertebrará en el hilemorfismo.

Para Platón existe un mundo de realidades inmutables y universales que el intelecto solo puede conocer y de las cuales participan las cosas sensibles, que son su copia. La hipótesis de la existencia de formas inteligibles entraña un doble problema, formulados en el diálogo *Parménides*: el de la participación de formas inteligibles entre sí y el de su participación por objetos sensibles. A la solución del primero se dedica *El Sofista*. Y para resolver el segundo, Platón introduce en el *Timeo* el demiurgo y la *khora*. Compete al demiurgo establecer un orden matemático en la *khora*. En este último diálogo se dice que la *khora* es un principio y posee existencia en sí misma. Aquí reconoce que las cosas sensibles son visibles y perceptibles por los sentidos; pertenecen, pues, al ámbito de la opinión; en cambio, las formas inteligibles son invisibles e inaccesibles a los sentidos; son aprehendidas por el intelecto al término de un acto de intelección; pueden constituir objeto de una enseñanza. Materia y *khora* son una y la misma cosa.

Aristóteles critica la *khora* en el marco de un estudio consagrado al lugar (*töpos*) en el capítulo primero del libro iv de la *Física*. Una crítica que resultó decisiva, pues a partir de entonces ya solo se hablará de *hyle*. Se trata de algo más que una mera sustitución terminológica. Con ella nacerá una nueva concepción filosófica que impregnará la ciencia antigua y medieval.

Hyle indica para Aristóteles un conjunto de cosas diversas en número, especie y género. Sus significados principales son sustrato del cambio (en especial, del cambio sustancial), realidad indeterminada; potencia de contrarios; causa material, materia sensible, materia inteligible, materia generable y corruptible, materia susceptible de solo movimiento local y principio de multiplicación.

La escuela peripatética elaborará su física en torno a la distinción entre *materia prima* y *materia secunda*. La *materia prima* era el sustrato a partir del cual se generaban los cuerpos naturales; no existía por sí sola. Se trataba de mera potencia para convertirse en cuerpo natural cuando recibiera una forma sustancial, produciéndose así las propiedades y cualidades de sustancias corpóreas. Por *materia secunda* entendían los cuerpos sensibles, compuestos y empíricamente accesibles. Constituidos a partir de los elementos y sus propiedades, sus últimos componentes eran la materia prima y la forma sustancial.

Para adentrarse en la importancia concedida a la cuestión y a su grado de desarrollo, los léxicos y diccionarios ofrecen un riquísimo arsenal. O las enciclopedias de Arnold de Sajonia, Bartolomeo y Vincent de Beauvais, que se proponen ofrecer una descripción y una explicación del mundo tomando en consideración las nuevas fuentes filosóficas y científicas disponibles. Los tres viven en una época en que circulan las traducciones latinas de textos científicos árabes, así como la *Física* de Aristóteles y los cuatro primeros libros de su *Metafísica*. Arnold de Sajonia maneja muchas obras científicas árabes; mezcla extractos del *Timeo* con obras traducidas de Aristóteles. Aunque a veces confunde la fuente (el *Liber de quinque substantiis*, de Aristóteles, con el *Liber de quinque essentiis*, de Al-Kindi). Su enciclopedia se divide en cinco libros; el capítulo 7 del primer libro, que trata *De caelo et mundo*, lleva por título *De hyle*.

También en la primera mitad del siglo xiii, el franciscano Bartolomeo Anglico realizó sus estudios en París, antes de ser enviado a Magdeburg en 1231, donde compuso, hacia 1240, *De proprietatibus rerum*. Inglés de nacimiento, formado en París y ejerciente en Alemania, dispuso de numerosos contactos, fuentes y textos nuevos que consultó para redactar su enciclopedia. Consagra entero el libro 10 de esta a la materia y a los elementos. Reco-

ge la corriente agustiniana (*De genesi ad litteram* y *De genesi contra Manicheos*), donde encuentra la descripción del caos formado por mezcla de los cuatro elementos. Apoyado en el *Timeo*, concebirá así la materia como una *privatio*. Se inspira, además, en los atomistas. Bartolomeo adopta una postura ecléctica. Más proclive al aristotelismo que al platonismo, considera la materia como una mezcla de los cuatro elementos (agua, tierra, fuego y aire). En buena medida, la ciencia aristotélica venía mediatizada por el pensamiento árabe. Pero también en el mundo hebreo el tema de la materia fue debatido entre autores procedentes de España, Provenza e Italia. Para todos ellos, la materia formaba parte de la creación.

Sabido es que la naturaleza de la materia del firmamento y de los cuerpos celestes fue determinante para el asentamiento de la ciencia moderna. En la primera mitad del siglo xiv, Jean Buridan se planteó ya «si el cielo tenía materia», en su comentario al *De caelo* de Aristóteles. Pregunta singular a primera vista, por cuanto las estrellas y los planetas son cuerpos naturales, objetos de percepción y, por tanto, dotados de materia. En el lenguaje aristotélico eran *ousiai*, sustancias. Apoyándose en su «principio de economía», según el cual en la naturaleza no se pone nada inútilmente, Buridan afirma que la materia celeste es materia simple. Galileo retomará la cuestión. Y el problema cesará de ser tal cuando la nueva astronomía y la nueva física hayan reunificado la división del universo en región celeste y región terrestre y abran el camino a una nueva concepción de la materia.

En la segunda mitad de 1500, la física aristotélica adquiere un alto grado de sistematización en los escritos de catedráticos eminentes de universidades europeas, que quieren liberarla de cierto escolasticismo decadente. En 1590 aparece la publicación póstuma de los *De rebus naturalibus libri* de Jacopo Zabarella, titular desde 1563 de lógica en la Universidad de Padua y desde 1568 hasta su muerte de filosofía natural. De 1596 son los *Libri ad scientiam de natura attinentibus* de Francesco Piccolomini, profesor también de Padua. En 1596 se editan los *De principiis rerum naturalium* de Francesco Vimercati, médico de la mujer de Francisco I y profesor de La Sorbona. A 1553 se remonta el *De rerum naturalium principiis* de Simone Porzio. Aunque no pueda considerarse un aristotélico ortodoxo, a ese elenco puede agregarse Girolamo Cardano, quien al abordar en su *De subtilitate* (1550) los principios de la sustancia corpórea, se demuestra deudor de la física escolástica.

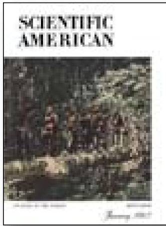
Hasta la primera mitad de los años treinta del siglo xvii, Marin Mersenne se adscribe a la visión aristotélico-escolástica del término *materia*. Pero da un cambio brusco, que será característico de un tiempo, en la segunda mitad de ese decenio. Asume la doctrina cartesiana. Materia es extensión y cuerpo físico. Spinoza proclama su materialismo ateo en el que Dios coincide con una naturaleza entendida como mera extensión. Spinoza afirma, tras los pasos de Descartes, que la sustancia corpórea no consiste en las cualidades secundarias o sensibles (dureza, blandura, etcétera), sino en la mera extensión: la materia es indefinidamente extensa, no es múltiple, sino en todas partes una y la misma.

También la noción de materia aparece a menudo en los escritos de Leibniz, con diferentes sentidos. Al final de su vida, Leibniz utiliza la noción de *materia* vinculándola con su metafísica monadológica, pero antes, en su juventud, se esforzó por cohonestar el aristotelismo escolástico con su dinámica, la nueva ciencia de la fuerza, el movimiento y la sustancia corpórea. La filosofía mecánica que le había atraído en un comienzo era la de Thomas Hobbes, expuesta en *De corpore* (1655), en particular su concepto de fuerza. Para cualquier filósofo que sostuviera que la esencia del cuerpo era la extensión, o la extensión y la impenetrabilidad, la idea maestra era la de fuerza. En el verano de 1676 descubre Leibniz el principio de igualdad de causa y efecto, una suerte de principio de conservación que declara que la capacidad de realizar un trabajo se conserva y no aumenta en la naturaleza. Podemos explicarlo todo en términos de tamaño, forma y movimiento; detrás de esas nociones geométricas se esconde la verdadera concepción de materia como fuerza pasiva.

En sus *Questiones Philosphicae*, Isaac Newton aborda una serie de cuestiones sobre los átomos y el vacío. El primer grupo de cuestiones se agrupa bajo el epígrafe «sobre la materia prima», y el segundo grupo bajo el epígrafe «sobre los átomos». Aquí la expresión materia prima emplea los términos peripatéticos, pero les otorga un sentido distinto. Materia será extensión y resistencia.

—Luis Alonso

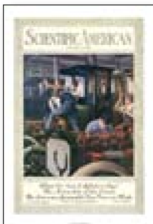
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Enero 1963

Guerra Fría

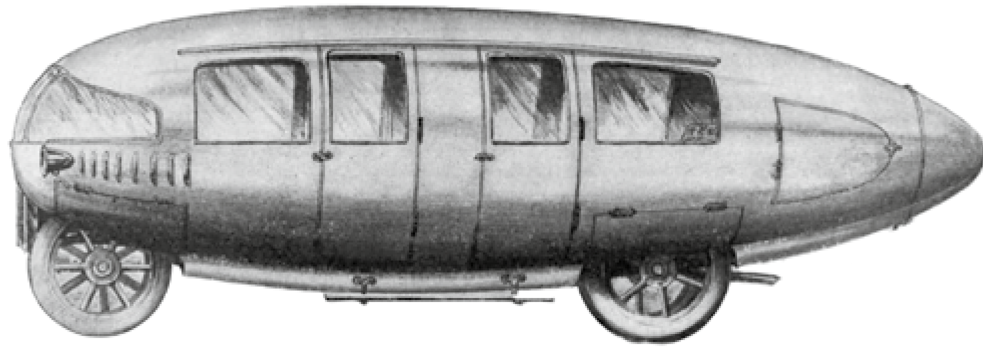
«En febrero pasado, en una nota de felicitación por el vuelo orbital de John H. Glenn, el primer ministro Jrushchov sugería que EE.UU. y la URSS compartieran algunos de sus proyectos de investigación espacial. El presidente Kennedy respondió proponiendo la cooperación en medicina espacial, satélites meteorológicos, satélites de comunicaciones, cartografiado del campo magnético terrestre y seguimiento de vehículos espaciales. En junio último se reunieron el experto soviético en cohetes Anatoli A. Blagonravov y el viceadministrador de la Administración Nacional para la Aeronáutica y el Espacio, Hugh L. Dryden, y presentaron recomendaciones para la realización conjunta de programas específicos en tres de esas áreas. Tras la aprobación de ambos Gobiernos —y un corto retraso a causa de la crisis de Cuba—, se anunció el acuerdo durante el debate en la ONU acerca de los usos pacíficos del espacio ultraterrestre.»



Enero 1913

Cavilaciones automovilísticas

«El automóvil del futuro no se parecerá al de hoy más de lo que la limusina de 1913 se asemeja al dos-à-dos de 1896. La limusina, o turismo torpedo, de este año no es sino un eslabón en la transición gradual desde la calesa de tracción equina de ayer hacia el «coche del futuro», completamente cerrado, hermético al polvo, silencioso y confortable. Por su aspecto exterior, parece más un submarino que un vehículo terrestre. Su carrocería en forma de cigarro puro lo encierra todo, salvo las ruedas.»



El coche del futuro, como lo veían en 1912.

El hombre de Piltdown

«En Piltdown Common, Sussex (Inglaterra), un paleontólogo inglés, el señor Dawson, descubrió hace cosa de un año un cráneo humano, bastante completo, que representa el vestigio más antiguo de la raza humana en las islas británicas y también uno de los más antiguos de los hallados en el planeta. Podría decirse que el cráneo de Piltdown se sitúa a medio camino entre el gorila y el hombre moderno, sin tener en cuenta que el cuerpo del gorila es más voluminoso que el del hombre. Sin embargo, el cráneo de Piltdown representa, al parecer, un tipo considerablemente superior a la raza de Neandertal, cuya frente es mucho más huidiza. Da la impresión, pues, de que en Europa occidental existió al menos un tipo muy inferior de hombre, con una frente relativamente alta, mucho antes de que el hombre de Neandertal, estrecho de frente, se extendiera por toda esa región.»

Sobre esos fósiles persistieron las dudas; en 1953 tres científicos británicos demostraron que el hombre de Piltdown era un engaño.



Enero 1863

Histerismo y delincuencia

«Informa el *London Daily News* de que el pánico a la estrangulación por garrote se ha adueñado de aquella gran ciudad y está impulsando a los ciudadanos a tomar unas medidas de protección verdaderamente ridículas. Los revólveres y los cuchillos Bowie son armas sencillas comparadas con los peligrosos utensilios que portan algunos de los que están dispuestos a defenderse por sí mismos. Hoy en la ciudad se venden cachiporras que despliegan bayonetas y bastones que esconden puñales o espadas con menos tapujos que si se vendiesen naranjas o castañas. Se han celebrado mítines y formado sociedades antigarrote para la protección mutua. Sin embargo, pese a esas medidas, los atracos con garrote parecen ir en aumento y todo Londres, es decir, todo el Londres adinerado, está trastornado y asustado.»

Información que nos da la luz

«Recientes descubrimientos científicos han otorgado al hombre nuevas potencias para la investigación, por las cuales la naturaleza ha sido obligada a revelar unos secretos tan sutiles que en ellos nunca antes había soñado la filosofía. Sir Isaac Newton fue el primero en dividir en sus partes un rayo de luz y demostró así que se componía de varios colores, pero la cuestión, gracias a los espléndidos descubrimientos de dos profesores alemanes, Kirchoff y Bunsen, se ha elevado recientemente a la categoría de ciencia especializada con el nombre de "análisis espectral". El profesor Kirchoff empleó cuatro prismas esmeradamente tallados para examinar el espectro solar recogido por un telescopio de 40 aumentos. Vio unas series completas de bandas nebulosas y líneas oscuras, y con ello inauguró un nuevo campo de observación, como el que antes había abierto el microscopio. Que se hagan esas líneas oscuras, se conjetura, revela la composición química de la atmósfera del Sol.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVIII, N.º 2, 11 DE ENERO DE 1913

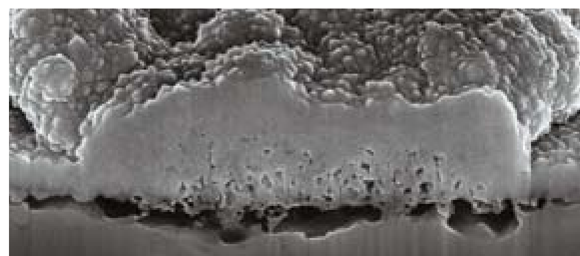
INNOVACIÓN

Ideas transformadoras

VV.AA.

Diez innovaciones radicales que podrían alterar nuestra vida.





MATERIALES

El caso de los daguerrotipos evanescentes

Daniel Grushkin

De cómo un equipo de físicos salvó de la destrucción unas inestimables imágenes de los primeros días de la fotografía.

BIOTECNOLOGÍA

La nube negra de la depresión

Robin Marantz Henig

Los antidepresivos dejan mucho que desear. Hacen falta semanas para que empiecen a surtir efecto y en ocasiones fracasan. Los investigadores buscan mejores tratamientos.



CAMBIO CLIMÁTICO

Los inviernos de nuestro descontento

Charles H. Greene

El deshielo de la banquisa ártica inclina la balanza en favor de los inviernos severos en Estados Unidos y Europa.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza,
Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón,
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado,
Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman,
Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser,
Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Ian Brown
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER,
MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss
ADVISER, PUBLISHING AND BUSINESS
DEVELOPMENT Bruce Brandfon

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Alberto Ramos: *La vida interior de los quarks*; Sara Arganda: *Cultivo ocular*; Fabio Teixidó: *Calentamiento global: ¿más rápido de lo previsto? y La carrera por el mayor refractor del mundo*; Juan Pedro Adrados: *Ingeniería empírica de programas*; Luis Cardona: *El ave más extraña*; Luis Bou: *Autismo y mente técnica*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes y De cerca*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

EX LIBRIS Scan Digit



The Doctor